TEXTE
65/2011

Anwendung von Boden-daten in der Klima-forschung

Umwelt Bundes Amt
Für Mensch und Umwelt

| TEXTE | 65/2011

UMWELTFORSCHUNGSPLAN DES
BUNDESMINISTERIUMS FÜR UMWELT,
NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT

Forschungskennzahl 3708 71 205 01
UBA-FB 001534

Anwendung von Bodendaten in der Klimaforschung

von

Carolin Kaufmann-Boll, Wolfgang Kappler, Dr. Silvia Lazar, Dr. Georg Meiners, Bettina Tischler
ahu AG Wasser - Boden – Geomatik, Aachen

Dr. Rainer Baritz, Dr. Olaf Düwel, Dr. Rainer Hoffmann, Dr. Jens Utermann
BGR Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover

Prof. Dr. Franz Makeschin, Dr. Mengistu Abiy
Technische Universität Dresden, Tharandt

Prof. Dr. agr. Jörg Rinklebe, Andrea Prüß, Carsten Schilli
Bergische Universität Wuppertal, Wuppertal

Dr. Anneke Beylich, Ulfert Graefe
IFAB Institut für Angewandte Bodenbiologie GmbH, Hamburg

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

UMWELTBUNDESAMT

Diese Publikation ist ausschließlich als Download unter
http://www.uba.de/uba-info-medien/4187.html
verfügbar. Hier finden Sie auch eine deutsche Kurzfassung.

Die in der Studie geäußerten Ansichten
und Meinungen müssen nicht mit denen des
Herausgebers übereinstimmen.

ISSN 1862-4804

Durchführung der Studie:

ahu AG Wasser · Boden · Geomatik
Kirberichshofer Weg 6
52066 Aachen

Technische Universität Dresden
Pienner Straße 9
01737 Tharandt

BGR Bundesanstalt für
Geowissenschaften und Rohstoffe
Stilleweg 2
30655 Hannover

Bergische Universität Wuppertal
Pauluskirchstraße 7
42285 Wuppertal

IFAB Institut für Angewandte Bodenbiologie GmbH
Sodenkamp 62
22337 Hamburg

Abschlussdatum: Juni 2011

Herausgeber: Umweltbundesamt
Wörlitzer Platz 1
06844 Dessau-Roßlau
Tel.: 0340/2103-0
Telefax: 0340/2103 2285
E-Mail: info@umweltbundesamt.de
Internet: http://www.umweltbundesamt.de
http://fuer-mensch-und-umwelt.de/

Redaktion: Fachgebiet II 2.7 Bodenzustand, Bodenmonitoring
Jeannette Mathews, Stephan Marahrens, Falk Hilliges

Dessau-Roßlau, Oktober 2011

1. Berichtsnummer **UBA FB 001534**	**2.**	**3.** II 2.7 Bodenzustand, Bodenmonitoring
4. Titel des Berichts Anwendung von Bodendaten in der Klimaforschung		
5. Autor(en), Name(n), Vorname(n) ahu AG: Carolin Kaufmann-Boll, Wolfgang Kappler, Dr. Silvia Lazar, Dr. Georg Meiners, Bettina Tischler BGR: Dr. Rainer Baritz, Dr. Olaf Düwel, Dr. Rainer Hoffmann, Dr. Jens Utermann Technische Universität Dresden, Institut für Bodenkunde und Standortslehre: Prof. Dr. Franz Makeschin, Dr. Mengistu Abiy Bergische Universität Wuppertal, Institut für Grundbau, Abfall- und Wasserwesen, Lehr- und Forschungsgebiet Boden- und Grundwassermanagement: Prof. Dr. agr. Jörg Rinklebe, Andrea Prüß, Carsten Schilli IFAB Institut für Angewandte Bodenbiologie GmbH: Dr. Anneke Beylich, Ulfert Graefe	**8. Abschlussdatum** 30. Juni 2011 **9. Veröffentlichungsdatum** Oktober 2011	
6. Durchführende Institution (Name, Anschrift) Kooperationsgemeinschaft: ahu AG Wasser · Boden · Geomatik, Kirberichshofer Weg 6 D-52066 Aachen BGR Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe Stilleweg 2 30655 Hannover Technische Universität Dresden, Institut für Bodenkunde und Standortslehre Pienner Straße 9 01737 Tharandt Bergische Universität Wuppertal, Institut für Grundbau, Abfall- und Wasserwesen, Lehr- und Forschungsgebiet Boden- und Grundwasser-management Pauluskirchstraße 7 42285 Wuppertal IFAB Institut für Angewandte Bodenbiologie GmbH Sodenkamp 62 22337 Hamburg	**10. UFOPLAN-Nr.** 3708 71 205 01 **11. Seitenzahl** 376	
7. Fördernde Institution (Name, Anschrift) Umweltbundesamt Wörlitzer Platz 1 D-06844 Dessau	**12. Literaturangaben** 383 **13. Tabellen** 41 **14. Abbildungen u. Diagramme** 31	

16. Zusammenfassung

Für die Umsetzung der Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel (DAS) für das Schutzgut Boden sind belastbare Daten und zuverlässige Zeitreihen über die langfristigen Veränderungen des Bodenzustands und der Bodenfunktionen erforderlich. Die Instrumente des Bodenmonitoring und der Erfassung des Bodenzustands stellen dabei unerlässliche Datengrundlagen dar. In Deutschland bestehen dauerhaft eingerichtete Monitoringprogramme mit repräsentativen Standorten und es finden regelmäßig rasterbasierte Erhebungen des Bodenzustands statt. Die Programme arbeiten in unterschiedlichem Maß nach zwischen den Beteiligten abgestimmten Grundsätzen. Informationen über Bodendaten sind gegenwärtig uneinheitlich und liegen verteilt an vielen Stellen vor, d.h. insbesondere hinsichtlich der Bereitstellung von (Meta-)Daten besteht ein Verbesserungspotenzial. Im BOKLIM-Vorhaben wurde die Eignung von Bodendaten aus den wichtigsten bundesweit und dauerhaft betriebenen Programmen des Bodenmonitoring und der Bodenzustandserhebung für die Klimaforschung erstmals messnetzübergreifend bewertet. Im Fokus standen dabei Fragestellungen zur Veränderungen des Bodenzustands aufgrund von Klimaänderungen. Demnach liefern die Programme eine Vielzahl wertvoller Daten zur Beurteilung der Wirkungen von Klimaänderungen auf Böden. Je nach Fragestellung und den sich daraus ergebenden Anforderungen eignen sich die Daten 1) für die langfristige Überwachung von Änderungen des Bodenzustands, 2) für Prozessstudien und vertiefende Messungen an repräsentativen Standorten z.B. auch zur Kalibrierung und Validierung von Prognosemodellen sowie 3) für den Einsatz in Modellszenarien zu Veränderungen des Bodenzustands. Allerdings ist es notwendig, die Programme des Bodenmonitoring und der Bodenzustandserhebung mit Ausrichtung auf konkrete Fragestellungen zu koordinieren und an bestimmten Stellen anzupassen, um deren Potenzial für Fragen von Klimawandel und Anpassung nutzen zu können. Neben der Bewertung der Bodendaten liegt ein erstes Konzept zur effizienten Datenbereitstellung und -nutzung vor. Empfehlungen für nächste Schritte zur Koordinierung und Optimierung künftiger Mess- und Erhebungsaktivitäten werden den jeweils zuständigen Institutionen und Akteuren zugeordnet; Forschungsbedarf wird aufgezeigt. Die Empfehlungen sind auf klimarelevante Fragen ausgerichtet, enthalten jedoch auch viele themenunabhängige Aspekte, die z.B. für den Bodenschutz oder die Biodiversitätsstrategie aufgegriffen werden können.

17. Schlagwörter

Bodendaten, Bodenmonitoring, Bodenzustandserhebung, Dauerfeldversuche, Klimaforschung, Klimafolgen, Klimaanpassung

18. Preis	19.	20.

1. Report Number **UBA FB 001534**	**2.**	**3.** II 2.7 Bodenzustand, Bodenmonitoring
4. Report Title Application of soil data in climate research		
5. Author(s), Surname(s), Given Name(s) ahu AG: Carolin Kaufmann-Boll, Wolfgang Kappler, Dr. Silvia Lazar, Dr. Georg Meiners, Bettina Tischler BGR: Dr. Rainer Baritz, Dr. Olaf Düwel, Dr. Rainer Hoffmann, Dr. Jens Utermann Technische Universität Dresden, Institut für Bodenkunde und Standortslehre: Prof. Dr. Franz Makeschin, Dr. Mengistu Abiy Bergische Universität Wuppertal, Institut für Grundbau, Abfall- und Wasserwesen, Lehr- und Forschungsgebiet Boden- und Grundwassermanagement: Prof. Dr. agr. Jörg Rinklebe, Andrea Prüß, Carsten Schilli IFAB Institut für Angewandte Bodenbiologie GmbH: Dr. Anneke Beylich, Ulfert Graefe		**8. Date of Completion** 30.06.2011 **9. Date of Publication** October 2011
6. Participating Institution (Name, Addresses) Consortium: ahu AG Wasser · Boden · Geomatik, Kirberichshofer Weg 6 D-52066 Aachen BGR Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe Stilleweg 2 30655 Hannover Technische Universität Dresden, Institut für Bodenkunde und Standortslehre Pienner Straße 9 01737 Tharandt Bergische Universität Wuppertal, Institut für Grundbau, Abfall- und Wasserwesen, Lehr- und Forschungsgebiet Boden- und Grundwassermanagement Pauluskirchstraße 7 42285 Wuppertal IFAB Institut für Angewandte Bodenbiologie GmbH Sodenkamp 62 22337 Hamburg		**10. UFOPLAN-Nr.** 3708 71 205 01 **11. Number of Pages** 376
7. Sponsor Institution (Name, Address) Federal Environmental Agency Wörlitzer Platz 1 D-06844 Dessau		**12. Literature Information** 383 **13. Tables** 41 **14. Figures and Diagrams** 31

16. Summary

The German Strategy for Adaptation to Climate Change was adopted in 2008. The implementation of the strategy requires reliable data and time series on the long-term changes in soil condition and soil functions. Soil monitoring and soil survey are essential data bases for this purpose. In Germany there are permanently established monitoring programmes with representative locations and repeated soil surveys based on a regular grid of sites. The different programmes vary in respect to harmonization regarding agreed principles between the participating institutions. Information on soil measuring data is currently heterogeneous and distributed at many locations. Particularly the provision of (meta-)data should be improved. Here you can find the exceptional quality of BOKLIM. It evaluates the suitability of soil data for climate research across the different measuring programmes in Germany. The most important nation-wide and permanently operating programmes of soil monitoring and soil survey were taken into account. The main aspects were the changes in soil condition due to climate change. As a result, the programmes provide a variety of valuable data to assess the effects of climate change on soils. Depending on the problem and the resulting requirements, the data are suitable 1) for the long-term monitoring of changes in soil condition, 2) for detailed process studies and measurements at representative locations, e.g. for the calibration and validation of predictive models, and 3) for use in model scenarios predicting changes in soil condition. However, it is necessary to coordinate the programmes of soil monitoring and soil survey with the focus on precise questions. The programmes have to be optimized at certain points to improve for issues of climate change and adaptation. In addition to the evaluation of soil data, a first concept for an efficient data provision and data use was created. Recommendations for next steps to coordinate and optimize future monitoring and survey activities and for data provision are adviced to the relevant competent institutions and actors. Further research needs were identified. The recommendations aim at improving the interaction between climate change and soil conditions. They can also be taken up for other research fields such as soil protection aspects or biodiversity strategy aspects.

17. Keywords

Soil data, soil monitoring, soil condition, long-term field experiments, climate research, climate change, climate impacts, climate adaptation

18. Price	19.	20.

Danksagung

Das BOKLIM-Vorhaben wurde von vielen Personen und Institutionen unterstützt. Diesen möchten wir herzlich danken. Besonderer Dank gilt den Mitgliedern des Projektbeirates und den Teilnehmern des BOKLIM-Workshops, durch deren Feedback zu Hypothesen und Vorschlägen die Ergebnisse maßgeblich ergänzt und verbessert wurden. Weiterhin richtet sich besonderer Dank an Dr. Andreas Will (BTU Cottbus, LS Umweltmeteorologie), Dr. Michael Trepel (Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume Schleswig-Holstein) und Dr. Dieter Feldhaus (Landesamt für Geologie und Bergwesen Sachsen-Anhalt) für konstruktive Anregungen und Hinweise.

Inhalt

EINLEITUNG 17

1 ERWARTETE KLIMAÄNDERUNGEN IN DEUTSCHLAND 25

2 WIRKUNG VON KLIMAÄNDERUNGEN AUF BÖDEN 28

3 EINSATZ VON BODENDATEN IN DER KLIMASYSTEM-, KLIMAFOLGEN- UND –ANPASSUNGSFORSCHUNG 33

3.1 Grundlagen 34

3.1.1 Angebot von Bodendaten in Deutschland 34

3.1.2 Datenbedarf für Klimasystem-, Klimafolgen- und -anpassungsforschung 48

3.1.3 Initiativen auf Bund-/Länder-Ebene 56

3.1.4 Messgrößen für klimabedingte Veränderungen des Bodenzustands 58

3.1.5 Anforderungen an die Datenerhebung und effiziente Datennutzung 62

3.2 Eignung von Daten aus Bodenmonitoring und Bodenzustandserhebung - Themenübergreifende Bewertung 70

3.2.1 Anwendungsbereiche von Bodendaten 70

3.2.2 Programmspezifische Dateneignung 74

3.2.3 Mögliche Aussagen und Nutzen von Bodenmonitoring und Bodenzustandserhebung für die Arbeiten der Bundesregierung am Aktionsplan Anpassung 80

3.2.4 Eingangsdaten für Modelle 81

3.2.5 Räumliche Aussagen zu Bodenzustand und klimabedingten Veränderungen 84

3.2.6 Defizite der Programme des Bodenmonitorings und der Bodenzustandserhebung 88

3.3 Detaillierte Bewertung der Dateneignung für verschiedene Themen 94

3.3.1 Nichtstofflicher Bodenzustand und -prozesse – Erosion und Verdichtung 94

3.3.2 Bodenwasserhaushalt 117

3.3.3 Bodenstoffhaushalt, stoffliche Bodenbelastungen 139

3.3.4 Bodenmikrobiologie 175

3.3.5 Bodenzoologie 193

3.3.6 Klimarelevante Gase 214

3.4 Zusammenfassendes Fazit über die Eignung von Daten aus Bodenmonitoring und Bodenzustandserhebung für die Bearbeitung bodenspezifischer Themenbereiche 232

3.5 Kosten und Nutzen der Bereitstellung von Daten aus Bodenmonitoring und Bodenzustandserhebung 236

4 DATENBEREITSTELLUNG UND EFFIZIENTE NUTZUNG VON BODENDATEN 241

4.1 Aufgabenstellung und Vorgehensweise 243

4.2 Bereitstellung von Daten für die Klimafolgenforschung und -anpassung. 249

4.3 Anforderungen an eine effiziente Datenbereitstellung 254

4.3.1 Rechtliche Anforderungen und Normen 254

4.3.2 Anforderungen der Akteure 259

4.3.3 Anforderungen an Metadaten und Daten 262

4.3.4 Technische Anforderungen 264

4.4 Metadaten und Metadatenportale 270

4.4.1 Metadaten – Begriffsbestimmung und technische Strukturen 270

4.4.2 Vorschlag eines Metadatenprofils für Bodenmessdaten 272

4.5 Aktuelle und zukünftige Dateninfrastrukturen 277

4.5.1 INSPIRE/ESDI 279

4.5.2 GDI-DE / Geoportal Bund 280

4.5.3 PortalU 284

4.5.4 GS Soil 288

4.6 Zukunftsszenario 290

5 INFORMATION und Kommunikation 295

6 EMPFEHLUNGEN für Bodenmonitoring und Bodenzustands-erhebung zum Einsatz in der Klimafolgen- und -anpassungsforschung 299

6.1 Anpassung der Programme 299

6.2 Umsetzungskonzept für die Bereitstellung und effiziente Nutzung von Bodendaten 312

6.3 Förderung von Information und Kommunikation 319

7 Fazit UND Ausblick 324

8 LITERATUR 327

Anlagen

ANLAGE 1 Bodenwissenschaftliche Forschung mit Bezug zum Klimaschutz

ANLAGE 2 Vertiefende Informationen zum nichtstofflichem Bodenzustand und -prozessen

ANLAGE 3 Poster „Bodendaten in der Klimafolgen- und Klimaanpassungsforschung“

ANLAGE 4 Vorschlag BOKLIM-Metadatenprofil

Abbildungen

Abb. 0.1: Zielgruppen der Informations- und Kommunikationsarbeit 20

Abb. 3.1: Vorgehensweise bei der Analyse der Anwendungspotenziale von Bodendaten 33

Abb. 3.2: Übersicht laufender bodenbezogener Messaktivitäten in Deutschland 39

Abb. 3.3: Messstandorte von Bodenmonitoring und Bodenzustandserhebung (ohne geplante Standorte der BZE Landwirtschaft) Datengrundlagen: UBA, vTI, LGB RLP. Stand 12/2010 43

Abb. 3.4: In den Bundesländern im Wesentlichen eingesetzte Modelle zur Prognose der Wassererosion (nach Bundesverband Boden 2006) 108

Abb. 3.5: Weltübersichtkarte der Vorräte an organischen Kohlenstoff im Boden sowie Einflussfaktoren der Haupteinträge und -austräge des Bodenkohlenstoffs 141

Abb. 3.6: Saisonale Dynamik der mikrobiellen Biomasse im aM-Horizont eines Vega-Gleys aus Auenschluffton in Abhängigkeit von der Bodenfeuchte (Rinklebe 2004) 178

Abb. 3.7: Saisonale Dynamik der mikrobiellen Biomasse im aAh-Horizont einer Vega aus Auensandlehm in Abhängigkeit von der Bodentemperatur (Rinklebe 2004) 181

Abb. 3.8: Bodenatmungsrate bei verschiedenen Temperaturen und Bodenfeuchten (Paul & Clark 1996) 183

Abb. 3.9: Bodenmikrobiologische Methoden (aus: Nannipieri et al. 2003: Microbial diversity and soil functions. European Journal of Soil Science. 54. 655-670) 189

Abb. 3.10: Klima-Ökogramm der Fichte (aus Kölling 2007). 195

Abb. 3.11: Größenklassen der Bodenorganismen bezogen auf den Durchmesser der Organismen (nach Swift et al. 1979) 196

Abb. 3.12: Verschiebung der Aktivität der Kleinringelwurmzönose entlang der Humusformenreihe allmählich vom Mineralboden in die Auflage bei gleichzeitiger Abnahme der Artenvielfalt 200

Abb. 3.13:	Vereinfachtes Schema für Faktoren der THG-Emissionen auf landwirtschaftlich genutzten Flächen und ihre Wechselwirkungen mit Temperatur, Niederschlag und Bodenwasserhaushalt	216
Abb. 3.14:	Schematische Darstellung des konzeptionellen „Hole-in-the-pipe"-Modells	219
Abb. 3.15:	Wege der chemoautotrophen Nitrifikation und der Denitrifikation (Firestone & Davidson 1989)	220
Abb. 3.16:	Schematische Darstellung der von oxidierenden und reduzierenden Zonen in einem Bodenprofil (nach Topp & Pattey 1997)	225
Abb. 4.1:	INSPIRE-Zeitplan Quelle: http://www.gdi-de.org/inspire/zeitplan, zuletzt abgerufen 22.02.2011)	257
Abb. 4.2:	Publish-Find-Bind-Muster einer Dateninfrastruktur (Quelle: Koordinierungsstelle der Geodateninfrastruktur Deutschland 2010 4-1, S. 20)	266
Abb. 4.3:	Beispielarchitektur GDI-DE (Quelle: Koordinierungsstelle der Geodateninfrastruktur Deutschland 2010 4-1, S. 20)	266
Abb. 4.4:	Überschneidungsbereiche unterschiedlicher Metadatenprofile (Quelle: Tomáš Řezník (GS Soil, D3.1/D3.2, 2010))	273
Abb. 4.5:	Beispielhafte Metadatenelemente im GS Soil Metadatenprofil, dargestellt anhand einer Karte	274
Abb. 4.6:	GDI-Hierarchie in Europa (Quelle: Koordinierungsstelle der Geodateninfrastruktur Deutschland 2010)	279
Abb. 4.6:	Recherchieren und „ernten" (hier Geoportal Bund erntet vom PortalU Metadatenkatalog; online-Ressource: http://www.geoportal.bund.de letzter Abruf 22.02.2011))	281
Abb. 4.8:	Datenflüsse in einer Geodateninfrastruktur (online-Ressourcen: http://www.geoportal.bund.de; http://www.pegelonline.wsv.de, letzter Abruf 22.02.2011)	283
Abb. 4.7:	PortalU erntet von unterschiedlichen Suchdiensten (s. „Quelle:…"; online-Ressource: http://www.portalU.de, letzter Abruf, 22.02.2011)	285
Abb. 4.9:	GS Soil Suchdienst findet PortalU Metadateneinträge	289
Abb. 4.10:	Konzept für die zukünftige Datenbereitstellung	293
Abb. 5.1:	Akteure Datengewinnung und -nutzung	295
Abb. 5.2:	Projekthomepage	297
Abb. 6.1:	Aufgaben zur Beurteilung der Wirkung von Klimaänderungen auf Böden	300

Tabellen

Tab. 1.1:	Trends für Temperatur und Niederschlag	26
Tab. 1.2:	Erwartete Klimaänderungen in Regionen Deutschlands bis zum Jahr 2100 (Quellen: Dt. Bundesregierung 2008, IPCC 2007)	27
Tab. 3.1:	Nutzen und Herausforderungen von fünf Ansätzen zur Untersuchung von Veränderungen der Böden (nach Richter et al. 2007, Soil Sci. Soc. Am. J. 71:266-279, verändert)	37
Tab 3.2:	Bodenparameter im Klimamodell COSMO-CLM (nach Doms et al. 2005)	50
Tab. 3.3:	Bedarf an Bodendaten für Fragen der Klimafolgen- und -anpassungsforschung	54
Tab. 3.4:	Herkunft von Bodendaten für Wasser- und Stoffhaushaltsmodelle	55
Tab. 3.5:	Parameter zur Messung klimabedingter Änderungen des Bodenzustands	60
Tab. 3.6:	Themenspezifische Mindestanforderungen für Bodenmonitoringaktivitäten zur Anwendung in der Klimafolgen- und -anpassungsforschung	65
Tab. 3.7:	Fragen zu Klimafolgen und -anpassung sowie Nutzen von deren Beantwortung (nach BOVA 2008, verändert und ergänzt)	80
Tab. 3.8:	Parameter (-gruppen) zur Modellkalibrierung und –validierung	82
Tab. 3.9:	Defizite für die Anwendung von Bodendaten aus Monitoring und Zustandserhebungen für themenspezifische Fragen von Klimafolgen und Klimaanpassung	91
Tab. 3.10:	Faktoren und Wirkungen der Bodenerosion	96
Tab. 3.11:	Ergebnisse von Studien über den Einfluss der Klimaänderung auf die Wassererosion (nach Scholz et al. 2008, ergänzt)	101
Tab. 3.12:	Punktuell vorliegende erosionsrelevante Parameter der Monitoring- und Erhebungsprogramme und der Landwirtschaftlichen Dauerfeldversuche (Auswahl)	104
Tab. 3.13:	Wassererosionsmodelle (Auswahl)	106
Tab. 3.14:	Winderosionsmodelle (Auswahl)	107
Tab. 3.15:	Klimawandelbedingte Auswirkungen und Folgen für den Bodenwasserhaushalt	121
Tab. 3.16:	Aktuelle Beispiele für Projekte und Forschungsvorhaben für Untersuchungen der klimabedingten Veränderungen des Bodenwasserhaushaltes	128
Tab. 3.17:	Beispiele für Modellierungen zum Bodenwasserhaushalt	130
Tab. 3.18:	Derzeit zu messende obligate und empfohlene (kursiv) Parameter auf BDF-Standorten (nach Barth et al. 2001)	133
Tab. 3.19:	Mögliche Auswirkungen des Klimawandels auf den Stoffhaushalt in Böden – gegliedert nach Bodenkompartimenten	147
Tab. 3.20:	Mögliche Auswirkungen des Klimawandels auf den Stoffhaushalt in Böden – gegliedert nach Regionen	155
Tab. 3.21:	Ausgewählte Projekte und Forschungsvorhaben für Untersuchungen der klimabedingten Veränderungen des Bodenstoffhaushaltes	166

Tab. 3.22:	Beispiele für Modellierungen zum Bodenstoffhaushalt	168
Tab. 3.23:	Temperatur- und Feuchtigkeitsoptimum verschiedener Bodenmikroorganismen (Feher & Frank 1937)	177
Tab. 3.24:	Derzeit zu messende obligate und empfohlene (kursiv) mikrobiologische Parameter (nach Barth et al. 2001).	188
Tab. 3.25:	Datenbedarf und Datenangebot zu Auswirkungen von Klimaänderungen auf die Bodenfauna	206
Tab. 3.26:	Modelle zur Dynamik klimarelevanter Gase in Böden (Auswahl)	228
Tab. 3.27:	Eingangsparameter für das DNDC-Modell (Denitrification-Decomposition-Model)	229
Tab. 3.28:	Eignung von Messdaten für die Erhebung und Beobachtung des Bodenzustands unter veränderten Klimabedingungen	234
Tab. 4-1:	Projekte und Aktivitäten mit Relevanz für die Entwicklung von bodenkundlichen Metadaten- und Datenspezifikationen	248
Tab. 4.2:	Übersicht der Datenbereitstellung	250
Tab. 4.3:	Eignung und Homogenität ausgewählter Datenbestände in Deutschland	251
Tab. 4.4:	Anforderungen an eine effiziente Datenbereitstellung	261
Tab. 4.5:	Überblick über die erforderlichen Elemente und Standards im Kontext einer recherchierbaren Dateninfrastruktur für klimarelevante Bodendaten	268
Tab. 4.6:	Maßgebliche Anforderungen	269
Tab. 4.7:	Übersicht und Erläuterung der einzelnen Infrastrukturprojekte	278
Tab. 4.8:	Anstehende Aufgaben auf dem Weg zur „Datenvernetzung der Zukunft“	294
Tab. 6.1:	Themenspezifische Empfehlungen für die Anpassung der Programme des Bodenmonitoring und der Bodenzustandserhebung an Anforderungen der Klimafolgenforschung und Anpassung	307
Tab. 6.2:	Themenspezifische Empfehlungen für vertiefende Untersuchungen/ Forschungsbedarf	310
Tab. 6.3:	Beispiel für Zielkonflikt	320

Abkürzungsverzeichnis

a	Jahr
Al	Aluminium
As	Arsen
ALKIS	Amtliches Liegenschaftskataster-Informationssystem
ARGE BOKLIM	Arbeitsgemeinschaft des Vorhabens „Anwendung von Bodendaten in der Klimaforschung“ (Autoren des vorliegenden Berichts)
BB	Brandenburg
BBodSchG	Bundes-Bodenschutzgesetz
BBodSchV	Bundesbodenschutz- und Altlastenverordnung
Basis-BDF	Boden-Dauerbeobachtungsflächen für die Merkmalsdokumentation
BDF	Boden-Dauerbeobachtungsflächen
BfG	Bundesanstalt für Gewässerkunde
BGR	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
BioSt-NachV	Biomassestrom-Nachhaltigkeitsverordnung
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BMELV	Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
BOVA	Ständiger Ausschuss 2 „Vorsorgender Bodenschutz“ der LABO
BW	Baden-Württemberg
BY	Bayern
BZE	Bodenzustandserhebung
BÜK	Bodenübersichtskarte
C	Kohlenstoff
Cd	Cadmium
C_{ges}	Gesamtkohlenstoff
C_{mic}	Mikrobielle Biomasse
C_{org}	organischer Kohlenstoff
CH_4	Methan
CO_2	Kohlendioxid
Cr	Chrom
^{137}Cs	Cäsium 137
Cu	Kupfer
DAS	Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel

DFG	Deutsche Forschungsgemeinschaft
DOC	Dissolved Organic Carbon (gelöster organischer Kohlenstoff)
DWD	Agrarmeteorologische Bodendaten des Deutschen Wetterdienstes
EU WRRL	Europäische Wasserrahmenrichtlinie
EZG	Einzugsgebiet
FFH	Fauna-Flora-Habitat
FISBo	Fachinformationssystem Bodenkunde
GAFA	Gutachterausschuss Forstliche Analytik
GDI-DE	Geodateninfrastruktur Deutschland
GeoZG	Geodatenzugangsgesetz
GOK	Geländeoberkante
HCB	Hexachlorbenzol
HCH	Hexachlorcyclohexan
HE	Hessen
Hg	Quecksilber
ICP	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 (Level I+II)
INSPIRE	Infrastructure for Spatial Information in the European Community
Intensiv-BDF	Boden-Dauerbeobachtungsflächen für die Prozessdokumentation
ISO	International Organization for Standardization
JRC	Joint Research Centre of the European Commission
KLIWA	Kooperationsvorhaben "Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft"
LABO	Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz
LUCAS	Land Use/Cover Area Frame Statistical Survey
LWF	Landwirtschaftliche Dauerfeldversuche
Mt	Megatonne
MV	Mecklenburg-Vorpommern
N	Stickstoff
NI	Niedersachsen
Ni	Nickel
N_2O	Distickstoffoxid
NW	Nordrhein-Westfalen
OBS	Organische Bodensubstanz

OGC	Open Geospatial Consortium
P	Phosphor
PAK	Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe
Pb	Blei
PCB	Polychlorierte Biphenyle
PCDD/F	Dioxine/Furane
PLFA	Phospholipid Fatty Acid
POP	Langlebige organische Schadstoffe
qCO_2	Metabolischer Quotient für Kohlendioxid
RP	Rheinland-Pfalz
S	Schwefel
SGD	Staatliche Geologische Dienste Deutschlands
SH	Schleswig-Holstein
SL	Saarland
SN	Sachsen-Anhalt
ST	Sachsen
SWE	Sensor Web Enablements
TERENO	Terrestrial Environmental Observatoria
TH	Thüringen
THG	Treibhausgas
TOC	Total Organic Carbon (Gesamtkohlenstoff)
UBA	Umweltbundesamt
UPB	Umweltprobenbank des Bundes (Probenart Boden)
VDLUFA	Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten
vTI	Johann Heinrich von Thünen-Institut – Bundesforschungsinstitut für Ländliche Räume, Wald und Fischerei
VwV	Verwaltungsvorschrift
Zn	Zink

EINLEITUNG

C. Kaufmann-Boll

Veranlassung

Der Bodenschutz ist ein wichtiges Themenfeld in der Klimaanpassung. Die Erarbeitung von Anpassungsstrategien für das Schutzgut Boden erfordert belastbare Daten und zuverlässige Zeitreihen über die langfristigen Veränderungen des Bodenzustands und der Bodenfunktionen. In Deutschland gibt es eine Vielzahl von Aktivitäten zur Erhebung des Bodenzustands und zum Bodenmonitoring, die regelmäßig wiederholt werden oder dauerhaft eingerichtet sind. Rasterbasierte Programme und Programme mit ausgewählten repräsentativen Messstandorten bestehen nebeneinander. Durch Monitoring bzw. Dauerbeobachtung können Veränderungen des Bodenzustandes und der Bodenfunktionen infolge des Klimawandels mit Messdaten dokumentiert und nachgewiesen werden. Die Informationen über Bodendaten sind gegenwärtig uneinheitlich und sie liegen verteilt an vielen Stellen vor; eine harmonisierte, zentrale Datenhaltung erfolgt nur teilweise. Ein Zugang zur Gesamtheit der vorhandenen Bodendaten für Datennutzer aus der Klimasystem-, Klimafolgen- und -anpassungsforschung ist derzeit nicht gewährleistet.

Aus der am 17.12.2008 vom Bundeskabinett beschlossenen Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel (DAS) (DEUTSCHE BUNDESREGIERUNG 2008) ergibt sich die Forderung nach einer Vernetzung der Instrumente zur Bodenzustandserhebung und zum Bodenmonitoring, einer Verbesserung des Datenzugangs sowie der Datenqualität und -verfügbarkeit. Diese Forderung aufgreifend, wurde im Auftrag des Umweltbundesamtes (UBA) das F+E-Vorhaben “Anwendung von Bodendaten in der Klimaforschung“ (BOKLIM), FKZ 3708 71 205 01, bearbeitet.

Ziele des Vorhabens

Die Ziele des Forschungsvorhabens sind:

- Verstärkter Einsatz der Bodenzustands- und Bodenmonitoringdaten in der Klimafolgen- und -anpassungsforschung

- Vernetzung der Instrumente zur Bodenzustandserhebung und zum Bodenmonitoring, Aufzeigen von Schnittstellen
- Verbesserung des Datenzugangs und der Datenverfügbarkeit
- Fachliche Unterstützung bei der Arbeit zur Vorbereitung des Aktionsplans Anpassung im Rahmen der Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel (DAS)

Vorgehensweise und Methoden

Das Projekt gliederte sich in fünf Aufgabenpakete:

A Projektorganisation

B Literatur-, Daten- und Aktivitätenrecherche sowie Analyse der Anwendungspotenziale (Datenbedarfs- und Eignungsanalyse)

Forschungs- und Datenreview zu Boden und Klima im Sinne angewandter Klimafolgen- und -anpassungsforschung

a. Untersuchung der zu berücksichtigenden Informations- und Literaturquellen sowie der laufenden Aktivitäten zur Bodenzustandserhebung und zum Bodenmonitoring auf ihre Anwendbarkeit

b. Analyse von Metadaten und wissenschaftlichen Ergebnissen aus der bereits durchgeführten Auswertung der Daten in Bezug auf die Anwendungspotenziale

c. Aufzeigen von Wegen und Möglichkeiten für den effizienten Einsatz von Daten und Ergebnissen aus Bodenzustandserhebung und Bodenmonitoring

C Konzept zur Datenbereitstellung und effizienten Datennutzung
Erarbeitung eines Konzeptes zur Bereitstellung, Integration und effizienten Nutzung verfügbarer Informationen und Daten zur Bodenzustandserhebung und zum Bodenmonitoring für die Fachanwender und die interessierte Öffentlichkeit

D Informationsarbeit für Datenbereitsteller und –nutzer
Unterstützung der Kooperation zwischen Datenbereitstellern und Datennutzern; Bekanntmachen des Datenangebots; Informieren über den Datenbedarf der Klimafolgen- und -anpassungsforschung

E Unterstützung der deutschen Strategie zu Klimafolgen und Anpassung an Klimaänderungen (DAS)
Erstellen von Dokumenten, Diagrammen und Karten für das Umweltbundesamt

Die bodenfachliche Bewertung wird themenübergreifend zusammengefasst und erfolgt vertiefend für die nachfolgend aufgeführten Themenbereiche:

- Nichtstofflicher Bodenzustand und –prozesse (Erosion und Verdichtung)
- Bodenwasserhaushalt
- Bodenstoffhaushalt, stoffliche Bodenbelastungen
- Bodenmikrobiologie
- Bodenzoologie
- Klimarelevante Gase

Die Landnutzung führt zu vielfältigen direkten und indirekten Wirkungen auf Böden; gleichwohl bestehen Rückwirkungen der Bodennutzung auf das Klima. Aspekte der Landnutzung werden im vorliegenden Bericht im Schwerpunkt in der themenübergreifenden Zusammenfassung behandelt.

Der Schwerpunkt des Vorhabens liegt auf dem Arbeitspaket B „Literatur-, Daten- und Aktivitätenrecherche sowie Analyse der Anwendungspotenziale“. Laufende Aktivitäten in Forschung und Bund-/Länder-Arbeitsgruppen wurden berücksichtigt. Die Anforderungen der allgemeinen Klimasystemforschung (z.B. Klimamodellierung) spielen im Vorhaben eine untergeordnete Rolle. Im Fokus steht die Forschung in Bezug auf Klimafolgen und Anpassung, in der das Medium Boden relevant ist.

Zur Umsetzung der aktiven Informationsarbeit wurden die Beteiligten und Ansprechpartner in einer Zielgruppenanalyse und Recherche ermittelt. Dies sind die Datennutzer auf Seiten der Klimafolgen- und -anpassungsforschung und die Bereitsteller von Bodendaten (z.B. Messnetzbetreiber). Ferner spielen auch die Akteure der Klima(system)forschung eine Rolle (s. Abb. 0.1). Die Internetseite www.boklim.de wurde konzipiert und während der Laufzeit des Vorhabens mit einem öffentlichen und einem projektinternen Bereich betrieben.

Ein am 29./30.09.2009 mit Vertretern der Zielgruppen durchgeführter UBA-Workshop „Anwendung von Bodendaten bei der Klimaanpassung“ diente der Diskussion von Zwischenergebnissen und der Vernetzung von Akteuren der Datenerhebung und Datennutzung. Die Beiträge und Ergebnisse des Workshops sind in einem UBA-Textband veröffentlicht (UMWELTBUNDESAMT 2010). Darüber hinaus wurden Informationsmaterialien wie Poster, Flyer und Projektnews eingesetzt. Als Beiträge zur DAS wurde ein Themenblatt „Boden“ sowie Grafiken und Folien erstellt. Diese sind kein Bestandteil des vorliegenden Berichts.

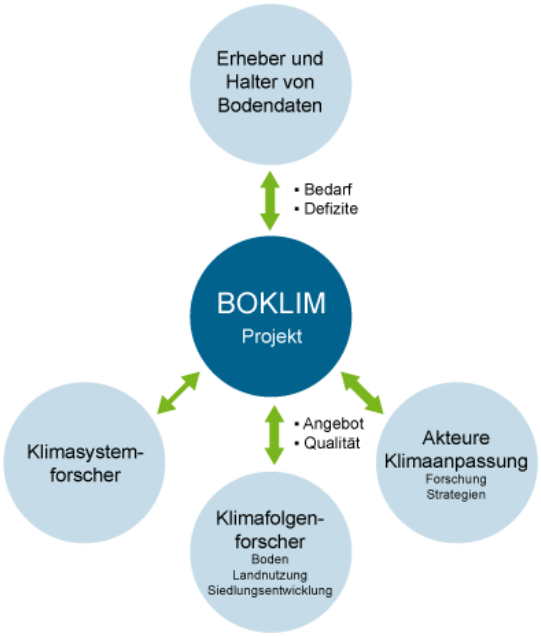


Abb. 0.1: Zielgruppen der Informations- und Kommunikationsarbeit

Das BOKLIM-Vorhaben diente nicht dazu, die in Bund, Ländern und Forschungseinrichtungen vorhandenen Messdaten von den erhebenden Institutionen zu beschaffen und zusammenzuführen. Für die Beurteilung der Eignung von Messdaten für entsprechende Fragestellungen wurden Metadaten und wissenschaftliches Fachwissen sowie vorliegende Bewertungen (BOVA REDAKTIONSGRUPPE „BDF/HUMUS/KLIMA“ 2010) einbezogen.

Ein Projektbeirat hat das Vorhaben fachlich beratend unterstützt. Im Beirat wurden das methodische Vorgehen und die Projektergebnisse diskutiert und abgestimmt. Der Bei-

rat setzte sich aus Vertretern der Themenkomplexe Boden-Dauerbeobachtung, Landwirtschaftliche Dauerfeldversuche, Bodenschätzung, Bodenzustandserhebung Wald (BZE II), Forstliches Umweltmonitoring, Bodenzustandserhebung Landwirtschaft und Klimaforschung zusammen:

Prof. Dr. agr. Frank Ellmer (Humboldt-Universität zu Berlin, Landwirtschaftlich-Gärtnerische Fakultät, Institut für Acker- und Pflanzenbau)

Dr. Frank Glante (Umweltbundesamt, FG II 2.7 Bodenzustand, Bodenmonitoring)

Dr. Stefan Hagemann (MPI-M Max-Planck-Institut für Meteorologie)

Thomas Rötscher (Thüringer Landesfinanzdirektion)

Dr. Clemens Siebner (Johann Heinrich von Thünen-Institut, Bundesforschungsinstitut für Ländliche Räume, Wald und Fischerei Braunschweig)

Dr. Nicole Wellbrock (Institut für Waldökologie und Waldinventuren Eberswalde)

Leitfragen

Die Bearbeitung orientierte sich an Leitfragen des Umweltbundesamtes:

<u>Übersicht Bodendaten</u>

- Welche Daten sind aus den laufenden Aktivitäten zur Bodenzustandserhebung und zum Bodenmonitoring verfügbar (Parameter, Häufigkeit, Analytikumfang, Grad der Flächenabdeckung)? Wie und wo sind die vorhandenen Daten in vorhandene Messnetze und Monitoringaktivitäten integriert? Wo bestehen fachliche Schnittstellen zwischen bodenbezogenen Erhebungs- und Monitoringsystemen? (siehe Kap. 3.1.1)
- Welche Bodendaten werden von der Klimafolgen- und -anpassungsforschung sowie von der Klimasystemforschung benötigt? (siehe Kap. 3.1.2)

<u>Datenbedarfs- und Eignungsanalyse</u>

- Welche Tendenzen sind aus der bereits durchgeführten Auswertung / Analyse von Daten aus Bodenmonitoring und -erhebung für den Boden ableitbar? (siehe Kap. 3.3)

- Auf welche Ergebnisse aus der bereits durchgeführten Auswertung / Analyse der genannten Daten können wir heute schon für die Klimaforschung zurückgreifen? (siehe Kap. 3.1.1)
- Mit welchen Parametern aus der Boden-Dauerbeobachtung, der Waldbodenzustandserhebung, den landwirtschaftlichen Feldversuchen und anderen berücksichtigten Datengrundlagen können klimabedingte Änderungen des Bodenzustands belegt werden? (siehe Kap. 3.1.4 und 3.3)
- Für welche Prozessbetrachtungen (z.B. Stoffbilanzen, Wasserhaushalt, Stoffdynamik) können die vorhandenen Daten zur Anwendung gebracht werden? (siehe Kap. 3.1.4 und 3.3)
- Wie ist die Eignung vorliegender Daten für Anwendungen in der Klimafolgen- und -anpassungsforschung zu bewerten? (siehe Kap. 3.2, 3.3 und 3.4)
- Welche Fragen können mit den verfügbaren Daten beantwortet werden? (siehe Kap. 3.2.3)
- Welche Eingangsdaten für Modellierungen sind verfügbar (z.B. Wasserhaushalts-, Erosionsmodelle)? (siehe Kap. 3.2.4 und 3.3)
- Welche räumlichen Aussagen zum Bodenzustand und dessen Veränderungen infolge von Klimaänderungen können getroffen werden? (siehe Kap. 3.2.4 und 3.3)
- Welche Auswertungs- und Regionalisierungsmethoden sind zur Generierung flächenhafter Aussagen von Bedeutung? (siehe Kap. 3.2.4 und 3.3)

<u>Aufzeigen von Wegen und Möglichkeiten für den effizienten Einsatz von Daten und Ergebnissen aus Bodenzustandserhebung und Bodenmonitoring in der Klimafolgen- und -anpassungsforschung</u>

- Welche Anforderungen bestehen an die Daten und ihre effiziente Nutzung (z.B. definierte Kerndatensätze mit Vorgaben zur Analytik bzw. Methoden bzgl. der Datenvergleichbarkeit, räumliche Verteilung, Stichprobenumfang, Verfügbarkeit, Datenformate bzgl. automatisierter Auswertungen)? (siehe Kap. 3.1.5 und 3.3)
- Welche Minimalanforderungen sind an Zustandserhebungs- oder Monitoringdaten (BDF, BZE, Level II, Dauerfeldversuche) zu stellen, um sie künftig effizient und länderübergreifend auswerten zu können? (siehe Kap. 3.1.5 und 3.3)

- Werden die Anforderungen an die Daten und ihre effiziente Nutzung erfüllt? Welche Defizite bestehen bzgl. der Vergleichbarkeit und Harmonisierung der Daten? (siehe Kap. 3.2.6 und 3.3)
- Wo und wie können die vorhandenen Daten interdisziplinär zum Einsatz gebracht werden? Gibt es bereits realisierte Praxisbeispiele? (siehe Kap. 3.3)
- Welche Aktivitäten zur Harmonisierung der Daten sind notwendig? (siehe Kap. 6)
- Was ist hinsichtlich der Eingangsdaten für Modellierungen für künftige Fragestellungen erforderlich? (siehe Kap. 6)
- Wo bietet sich zukünftig eine Zusammenarbeit zwischen einzelnen Aktivitäten der Bodenzustandserhebung und des Bodenmonitoring an? (siehe Kap. 6)

<u>Konzept Bereitstellung und effiziente Datennutzung</u>

- Wie kann eine effektive Informationsbereitstellung im Kontext der auf den Klimawandel ausgerichteten Bodenforschung etabliert werden, die die Bedürfnisse verschiedener Zielgruppen abdeckt? (siehe Kap. 4)
- Welche Informationen, Daten und Werkzeuge können jetzt und sollen zukünftig zur Verfügung gestellt werden? (siehe Kap. 4 und 6)
- Welche Medien und Techniken eignen sich für die Bereitstellung der benötigten Informationen, Daten und deren Auswertung? (siehe Kap. 4)
- Welche Interessenlagen der Zielgruppen und Datenbesitzer und -halter müssen berücksichtigt werden? (siehe Kap. 4)
- Welche Anforderungen ergeben sich aus den Umsetzungsspezifikationen des Bundes und der Länder gemäß dem im Februar 2009 in Kraft getretenen Geodatenzugangsgesetz, aktuellen Forschungsprojekten und Geodateninfrastrukturprojekten (GS Soil, GDI DE)? (siehe Kap. 4)
- Informationsarbeit für Datenbereitsteller und Datennutzer
- Welche Planungsaspekte (Flächennutzung, Waldumbau, Trinkwasserversorgung, Flächennutzung usw.) sind von den Daten/Aktivitäten betroffen bzw. welche Ressorts sind potenzielle Nutznießer der Daten? Welche Zielgruppen können angesprochen werden? (siehe Kap. 3.2.1)

- In welchen umweltpolitisch aktuellen Themenbereichen stellen die Daten der Bodenzustandserhebung und des Bodenmonitoring eine wichtige fachliche Bereicherung dar? (siehe Kap. 3.2.1)
- Wie können die vorliegenden Daten einem breiten Anwenderkreis zugänglich gemacht und öffentlichkeitswirksam vertrieben bzw. nutzerfreundlich zum Einsatz gebracht werden? (siehe Kap. 4)

Unterstützung Deutsche Anpassungsstrategie (DAS) und Aktionsplan Anpassung

- Welche Themen und Aktivitäten der DAS spielen für bodenbezogene Fragen eine Rolle? (siehe Kap. 3.2.3)
- Welche Ergebnisse aus interdisziplinären Datenauswertungen können für die weiteren Arbeiten an der DAS verwendet werden? (siehe Kap. 3.2.3)

Nicht alle genannten o.g. Leitfragen können in vergleichbarer Tiefe behandelt werden, da der Wissensstand in den bodenwissenschaftlichen Forschungsbereichen unterschiedlich ist.

Aufbau des Berichts

Kapitel 1 gibt einführend einen Überblick der erwarteten Klimaänderungen in Deutschland. In Kapitel 2 wird geprüft, wie Klimaänderungen auf Böden wirken, worauf in Kapitel 3 eine Analyse der Eignung von Daten aus Monitoring und Erhebungsprogrammen für Anwendungen in der Klimaforschung folgt. Fragen zur Datenbereitstellung und effizienten Nutzung von Bodendaten sind Gegenstand des Kapitels 4, bevor Aspekte zur Information und Kommunikation aus dem Vorhaben in Kapitel 5 betrachtet werden. Aus den in den Kernkapiteln 3, 4 und 5 benannten Anforderungen und Defiziten werden in Kapitel 6 Empfehlungen abgeleitet. Ein kurzes Fazit mit Ausblick schließt den Bericht ab.

1 ERWARTETE KLIMAÄNDERUNGEN IN DEUTSCHLAND

C. Kaufmann-Boll

In Deutschland waren in Bezug auf die Lufttemperatur, Niederschlagsmenge und -häufigkeit sowie das Auftreten von Extremereignissen deutliche Veränderungen im Vergleich zu den letzten 100 Jahren zu verzeichnen („Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel“, Dezember 2008). Basierend auf globalen Klimamodellen lassen sich Vorhersagen für künftige Klimaänderungen in einem groben Gitternetz treffen (bis zu 200 km). Vier regional differenziertere Klimamodelle für Deutschland (REMO, CLM, WETTREG, STAR) (DT. BUNDESREGIERUNG 2008), welchen statistische bzw. dynamische Modelle und Informationen aus den Globalmodellen zugrunde liegen, ermöglichen die Abschätzung kleinräumiger (bis 10 km) Klimaszenarien und -trends.

Generell ist die mittlere Lufttemperatur in Deutschland zwischen 1901 und 2006 um knapp 0,9 °C (Alpen 1,5 °C) gestiegen, wobei die 90er Jahre als wärmste Dekade des 20. Jahrhunderts angesehen werden (UMWELTBUNDESAMT 2008). Die jährliche Erwärmung wird vor allem in extrem warmen Sommermonaten (häufigere Tropennächte >20 °C) und einer hohen Anzahl an warmen Wintertagen (kein Frost) spürbar. Außergewöhnlich kalte Tage dagegen sind seltener geworden. Berechnungen regionaler Klimamodelle rechnen für den Zeitraum 2071 bis 2100 mit einem Anstieg der Jahresmitteltemperatur, die regional bis zu 3,7 °C höher liegen kann als in den vergangenen Jahrzehnten. Die jährliche Niederschlagsmenge im betrachteten Zeitraum ist um 9 % angestiegen, wobei die ersten 20 Jahre des 20. Jahrhunderts vergleichsweise trocken waren und in den letzten 15 Jahren überdurchschnittlich viel Niederschlag fiel. Die saisonale Verteilung des Niederschlags unterliegt ebenfalls Veränderungen im 100-jährigen Zeitraum. So nimmt die Niederschlagsmenge in den Wintermonaten und im Frühjahr (vor allem im März) deutlich zu (bis zu 40 %), im Sommer sind für ganz Deutschland keine Mengen-Trends sichtbar, jedoch eine Neuverteilung der Niederschläge innerhalb der Sommermonate (Juni regenreich, Juli und August regenarm) mit längeren Trockenperioden (Abnahme des Niederschlags bis zu 30 %). Gleichzeitig ist häufiger mit Starkniederschlägen zu rechnen. Die Windgeschwindigkeiten unterliegen periodischen Schwankungen, jedoch gibt es bislang keine signifikanten Trends für Veränderungen und den Anstieg der Häufigkeit von Sturmtagen (UMWELTBUNDESAMT 2008). Der gesicherte Nachweis dieser Veränderungstendenzen steht insbesonde-

re für die Niederschläge und deren Extrema noch aus. Von einem ansteigenden Trend der Lufttemperatur ist global, aber auch für Deutschland auszugehen.

Regionale Betrachtungen innerhalb Deutschlands anhand der erwähnten Klimamodelle zeigen, dass Südwestdeutschland, die zentralen Teile Ostdeutschlands (nordostdeutsches Tiefland, südostdeutsche Becken und Hügel), die Küstenregion der Nord- und Ostsee sowie die Alpen im Vergleich zu anderen deutschen Regionen sehr anfällig gegenüber Klimaänderungen sind. Die Resultate der ermittelten Trends variieren je nach Wahl des Klimamodells (s. Tab. 1.1). Art und Ausmaß der erwarteten Klimaänderung variieren regional (s. Tab. 1.2).

Tab. 1.1: Trends für Temperatur und Niederschlag

Temperatur	**Niederschlag**
- nach Süden hin stärkere Erwärmung ▪ 2021 bis 2050: um 1 °C (REMO, CLM) bis 2 °C (STAR) ▪ 2071 bis 2100 bis 3,5/3,7 °C, in Alpen stärker - von Osten nach Westen hin verstärkte Erwärmung ▪ 2021 bis 2050: um 0,5 °C (WETTREG) ▪ 2071 bis 2100 bis 2 °C	- Gesamtzunahme im Jahreszeitraum weitgehend in Westdeutschland - Ausgleich der Zunahme in Wintermonaten durch Abnahme in Sommermonaten in Ostdeutschland - Abnahme des Sommerniederschlags im Südwesten besonders stark - starker Anstieg des Winterniederschlags in den Mittelgebirgsregionen, Rheinland-Pfalz, Hessen, NO-Bayern (WETTREG) und Anstieg in den Frühjahrsmonaten (CLM, REMO) - Starkregenniederschläge im Osten weniger als im Westen Deutschlands

Tab. 1.2: Erwartete Klimaänderungen in Regionen Deutschlands bis zum Jahr 2100 (Quellen: DT. BUNDESREGIERUNG 2008, IPCC 2007)

Südwestdeutschland	- Temperaturanstieg seit 1901 besonders hoch (v. a. im Saarland) im Gegensatz zum restlichen Bundesgebiet - im Bereich des Oberrheingrabens wird die stärkste Erwärmung erwartet - erhöhte Hochwassergefahr im Frühjahr - häufigere sowie heftigere Starkregenereignisse - höchste Zunahme des Niederschlags in ganz Deutschland
Zentrale Mittelgebirge und Harz	- kühleres Klima (weniger starke Änderung der Frosttageanzahl), trotzdem gebietsweise Verdopplung der Sommertage - hohes Niederschlagsniveau (Abnahme der Sommerniederschläge, erhebliche Zunahme der Winterniederschläge)
Ostdeutschland (Zentral und Süden)	- aktuell und künftig verstärkt anfällig gegenüber abnehmender Wasserverfügbarkeit - Dürregefahr im Sommer
Alpen, Alb, südliches Hügelland, Süddeutschland	- alpine Gletscher ziehen sich seit 1850 kontinuierlich zurück - Jahresmitteltemperatur um 1,5 C gestiegen und weitere Temperaturzunahme - starke Verringerung der Niederschläge - Verdunstung verbleibender Niederschläge erhöht
Küstenregionen (Nordsee, Ostsee, Norddeutsches Tiefland)	- In Küstenregionen und Nordostdeutschland weniger starke Temperaturzunahme (Bsp. Mecklenburg-Vorpommern) - Veränderung der Häufigkeit von Temperaturkenntagen (Eistage, Frosttage, Sommertage, Tropennächte) - überdurchschnittliche Zunahme der Winterniederschläge für Nordseeküste und das nordwestdeutsche Tiefland - besonders starke Abnahme der Sommerniederschläge für Ostseeküste - Meeresspiegelanstieg mit im Mittel plus 30 Zentimeter

2 WIRKUNG VON KLIMAÄNDERUNGEN AUF BÖDEN

ARGE BOKLIM

Die in Deutschland erwarteten bzw. möglichen Klimaänderungen wirken sich auf den Bodenzustand und die Bodenfunktionen bzw. die im Boden relevanten Prozesse aus. Dabei ist zu beachten, dass die Vorhersage von Klimaänderungen auf verschiedenen Klimamodellen und deren Regionalisierungen beruht. Insofern sind die prognostizierten Klimaänderungen regional differenziert und unter Berücksichtigung der Unsicherheiten von Klimamodellen zu betrachten.

Mögliche Wirkungen der in Kapitel 1 beschriebenen Klimaänderungen lassen sich für verschiedene Bodenprozesse wie folgt zusammenfassen (für Details und Quellenangaben wird auf das Kapitel 3.3 verwiesen):

Insbesondere eine regional erwartete temperaturbedingt erhöhte potentielle Evapotranspiration und eine veränderte Niederschlagssituation werden flächenhaft den **Bodenwasserhaushalt** und die Grundwasserdynamik beeinflussen und auf die Entwicklung der Böden einwirken. Die Sickerwassermengen werden sich voraussichtlich bei einer regionalen Umverteilung der Niederschlagsintensität standortspezifisch ändern. Ein veränderter Bodenwasserhaushalt beeinflusst die biologische Aktivität und den Stoffhaushalt durch Stofftransporte mit dem Sickerwasser.

Die Standorteigenschaften im Hinblick auf eine landwirtschaftliche Nutzung können sich regional sowohl positiv als auch negativ ändern. Erhöhte Temperaturen können bei ausreichendem Wasserangebot eine Ertragssteigerung bewirken. Die erwartete Erhöhung der potenziellen Evapotranspiration kann jedoch – je nach Region – auch einen erhöhten Bewässerungsbedarf bedeuten. Der verstärkte Wasserverbrauch durch Pflanzen und die Verdunstung kann zu einer Versalzung von stark bewässerten Flächen führen. Eine Versalzung ist in subkontinental geprägten Regionen Ostdeutschlands mit bereits heute ausgeprägter Sommertrockenheit und insbesondere für Böden in Küstennähe zu befürchten, welche erstmalig durch die erwarteten steigenden Meeresspiegel mit Salzwasser in Kontakt kommen.

Die Temperaturerhöhung und die erwartete regionale Veränderung der Niederschlagsverteilung und -menge wirken sich auch auf die Artenzusammensetzung der Bodenlebensgemeinschaft und damit auf die **Biodiversität** aus. Zur Bodenlebensgemeinschaft gehören Mikroorganismen wie Pilze, Algen und Flechten sowie die Mikro-, Meso- und Makrofauna mit z.B. Einzellern, Fadenwürmern, Springschwänzen und Regenwürmern. Der Klimawandel stellt jedoch nicht grundsätzlich die Lebensraumfunktion des Bodens in Frage, sondern verändert die Lebensbedingungen an einem Standort. Hierdurch kann sich eine andere Bodenlebensgemeinschaft entwickeln, was wiederum das Leistungspotenzial der Böden im Hinblick auf die Filter- und Pufferfunktion, die Lebensraumfunktion und die Nutzungsfunktion für landwirtschaftliche Produktion beeinträchtigen kann.

Erhöhte Jahresmitteltemperaturen bewirken in der Regel eine Erhöhung der **mikrobiellen Aktivität** im Boden. Zudem setzt die Aktivität der Bodenmikroorganismen mit der Temperaturerhöhung im Jahresverlauf früher ein. Eine verstärkte mikrobielle Aktivität verursacht eine Erhöhung der Mineralisation und führt zum verstärkten Abbau der organischen Bodensubstanz (OBS). Der damit verbundene Humusschwund ist stark abhängig von Temperatur und Feuchtegehalt des Bodens. Eine Versauerung der Böden aufgrund erhöhter Nitrifikation als Folge einer gesteigerten mikrobiologischen Aktivität ist möglich. Die erwarteten klimabedingten Veränderungen können sich jedoch auch negativ auf die mikrobielle Aktivität auswirken. So wird diese beispielsweise gehemmt, wenn die Bodenfeuchte gering ist. Ein Grundwasseranstieg in den betroffenen Horizonten führt zu anaeroben Verhältnissen, die ebenfalls die mikrobielle Aktivität beeinflussen. Der mikrobielle Abbau wird außerdem entscheidend durch die Menge und Zusammensetzung der OBS beeinflusst. So zeigt sich z.B. eine Verringerung der mikrobiellen Aktivität aufgrund einer Reduzierung des leicht abbaubaren, labilen Kohlenstoffpools in Böden bei höheren Temperaturen. Das Ausmaß von Auswirkungen des Klimawandels auf die Bodenmikroorganismen hängt maßgeblich von der Nutzung und der Bewirtschaftung ab, da der Abbau der OBS aufgrund ihrer Zusammensetzung unter Ackerbau mitunter schneller voranschreitet. Die hier für Bodenmikroorganismen ausgeführten Zusammenhänge gelten mit wenigen Einschränkungen auch für die **Bodenfauna**.

Der **Gehalt an organischer Bodensubstanz** wird voraussichtlich durch die erwarteten Klimaänderungen beeinflusst. Generell dürften bei höheren Temperaturen die Mineralisationsprozesse im Boden und folglich der Abbau der OBS beschleunigt werden. Damit nimmt die Quantität der Kohlenstoffsequestrierung (Speicherung) in Böden ab, was wiederum Rückkopplungsmechanismen auf das Klima hervorrufen wird. Andererseits kann durch erhöhte Temperaturen und die damit verbundene längere Vegetationsperiode bei ausreichendem Wasserdargebot mehr Phytomasse gebildet werden; diese gelangt in den Boden und kann die Bodenkohlenstoffvorräte erhöhen.

Die Freisetzung der **klimarelevanten Gase** (Treibhausgase) Kohlendioxid (CO_2), Methan (CH_4) und Distickstoffoxid (N_2O) wird durch steigende Bodentemperaturen gefördert, sofern die damit zusammenhängenden biologischen Prozesse nicht durch andere Faktoren limitiert werden. Wichtig ist die Berücksichtigung der Wechselwirkungen, z.B. des hydrothermalen Regimes, also der Wechselwirkung zwischen Temperatur und Bodenfeuchte. Die Freisetzung klimarelevanter Gase wird ebenfalls durch die Nutzung bzw. die Standortbedingungen beeinflusst. So steht in Mooren beispielsweise ein erhöhtes Potenzial zur Freisetzung zur Verfügung.

Das regional beeinflusste hydrothermale Regime wirkt sich über die bodenmikrobielle Aktivität auf den Streuabbau, die Umsetzungen organischer Bodenstoffe und damit die **CO_2-Emission** aus. So können beispielsweise verminderte verfügbare Bodenwassergehalte den Streu- und Humusabbau und damit die CO_2-Freisetzung aus Böden limitieren. Dies ist z.B. für verschiedene Regionen mit abnehmenden Sommerniederschlägen zu erwarten. Auf Feuchtstandorten (Mooren) hängt die CO_2-Freisetzung vor allem vom Grundwasserstand ab, allerdings nicht in linearer Form. So nimmt bereits bei geringer Grundwasserabsenkung die CO_2-Freisetzung zu.

Böden können für Methan sowohl eine Quelle als auch eine Senke darstellen. **CH_4-Emissionen** aus Böden finden unter Sauerstoffabschluss statt. Feuchtgebiete, die reich an organischen Substanzen sind, spielen hier eine wesentliche Rolle. Die Freisetzung von Methan hängt ab vom Grundwasserstand, der Bodentemperatur sowie der Verfügbarkeit und Qualität der organischen Substanz. Es wird davon ausgegangen, dass hydromorphe organische Böden eine hohe CH_4 -Quellstärke aufweisen, während wechselfeuchte Böden eine hohe N_2O- Quellstärke besitzen.

Die **N_2O-Freisetzung** aus der Nitrifikation steigt i.d.R. bei hohen Gehalten nitrifizierbaren Stickstoffs, hohen Temperaturen, hohen pH-Werten sowie steigender Wassersättigung des Porenraumes eines sonst gut durchlüfteten Bodens. Unter anaeroben Bedingungen kann atmosphärisches N_2O zu N_2 reduziert werden (Denitrifikation), so dass die Böden hier als Senke wirken.

Die Mobilität von **Nähr- und Schadstoffen** wird entscheidend vom Gehalt des Bodens an organischer Substanz beeinflusst. Wird organische Substanz im Boden infolge des Klimawandels abgebaut, so werden daran gebundene Stoffe im Boden mobilisiert. Die Stoffe können durch die Erhöhung der Niederschlagsintensität verstärkt mit dem Sickerwasser verlagert werden und/oder durch die Erhöhung der Temperatur an der Bodenoberfläche ausgasen. Stickstoff (und z.T. Phosphor in organisch gebundener Form) könnten vermehrt ins Grundwasser ausgewaschen werden. Der Rückgang der klimatischen Wasserbilanz im Sommerhalbjahr kann zu einer Verringerung der Abbauleistung und der Filterfunktion des Bodens für Schadstoffe führen.

Die erwartete Klimaänderung und veränderte Saisonalitäten können vor allem zu einer höheren Gefährdung durch **Bodenerosion unter dem Einfluss von Wasser und Wind**, aber auch zu Änderungen des **Gefügezustands und damit einer Zunahme der Verdichtungsgefährdung** führen. Es wird derzeit davon ausgegangen, dass sich von den für die Bodenerosion entscheidenden Faktoren vor allem die Höhe und Intensität der Niederschläge sowie der Humusgehalt des Bodens verändern. Die Erosion durch Wind und Wasser wirkt sich neben dem Transport von Bodenmaterial auch auf den Stoffhaushalt der Böden aus. So können dem Boden durch den Abtrag des oberflächennahen Materials relevante Mengen an z.B. Phosphor, Stickstoff und Humus verloren gehen und möglicherweise angebundene Oberflächengewässer belasten.

Aus den vorangehenden Ausführungen leitet sich ab, dass Klimaänderungen vielfältige Einflüsse auf die Funktionen der Böden haben können. Die Funktionen des Bodens sind gemäß § 1 Bundes-Bodenschutzgesetz (BBodSchG) nachhaltig zu sichern oder wiederherzustellen. Es wird deutlich, dass Niederschlags- und Temperaturänderungen in engem Zusammenhang mit den vielfältigen Wechselwirkungen zwischen Bodenwasserhaushalt, Humusgehalt, Bodengefüge und biologischer Aktivität stehen. Insofern wirken die oben beschriebenen Einflüsse und Prozesse gleichermaßen auf die in § 2 BBodSchG beschriebenen natürlichen und nutzungsbezogenen Bodenfunktionen.

Im Ergebnis bereits durchgeführter Auswertungen von Daten aus Bodenmonitoring und Bodenzustanderhebung sind derzeit erst in geringem Umfang klimawandelinduzierte Tendenzen für den Boden ableitbar. Ausschließlich aus den bereits über längere Zeiträume (z.B. > 30 Jahre) betriebenen Programmen wie den landwirtschaftlichen Dauerfeldversuchen deuten sich heute bereits abnehmende Tendenzen der Kohlenstoffvorräte im Boden an, die auch durch klimatische Änderungen verursacht sein können. Nicht betrachtet wurden dabei bisher die Veränderungen, die durch eine veränderte Wirtschaftsweise (Kulturartenwechsel, Sortenwahl, Bodenbewirtschaftung usw.) eine Anpassung an den Klimawandel bewirken können (Rückkopplungseffekte).

3 EINSATZ VON BODENDATEN IN DER KLIMASYSTEM-, KLIMAFOLGEN- UND –ANPASSUNGSFORSCHUNG

ARGE BOKLIM

Dieses Kapitel umfasst die Bewertung von Programmen des Bodenmonitoring und der Bodenzustandserhebung im Hinblick auf ihren Einsatz zur Bewertung der Wirkungen von Klimaänderungen auf den Bodenzustand. Der Bewertung liegen die Ergebnisse einer Literatur-, Daten- und Aktivitätenrecherche zugrunde (siehe Kap. 3.1 und Anlage 1). Die Eignungsprüfung der Bodendaten erfolgte mit Blick auf die Anforderungen der Klimaforschung, um schließlich Handlungsempfehlungen ableiten zu können (siehe Abb. 3.1).

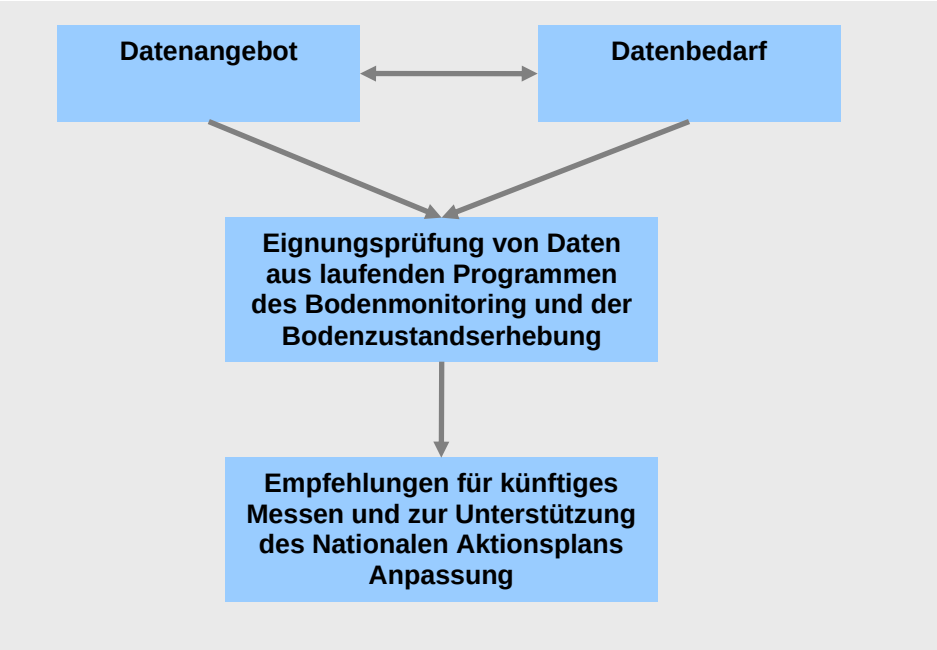


Abb. 3.1: Vorgehensweise bei der Analyse der Anwendungspotenziale von Bodendaten

Nach einer themenübergreifenden Darstellung (siehe Kap. 3.2) folgt eine vertiefende Analyse für verschiedene bodenfachliche Themen (siehe Kap. 3.3). Ein abschließendes Fazit zur Dateneignung (Kap. 3.4) und eine Betrachtung von Kosten und Nutzen der Programme des Bodenmonitoring und der Bodenzustandserhebung (Kap. 3.5) runden die fachliche Bewertung ab.

3.1 GRUNDLAGEN

3.1.1 Angebot von Bodendaten in Deutschland

C. Kaufmann-Boll

Die Anwendungspotenziale von Bodendaten für die Klimasystem-, Klimafolgen- und -anpassungsforschung lassen sich auf der Grundlage von Metadaten, d.h. anhand von Informationen über die Daten, prüfen. Für Bodenmessdaten aus bundesweit betriebenen und dauerhaft oder wiederholt durchgeführten Programmen, für thematisch relevante Forschungsprojekte sowie für wichtige Karten(werke) wurden Metadaten in Form von **Steckbriefen** zusammengestellt:

Bodenmessdaten

1 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 (Level I+II)

2 Erste Bodenzustandserhebung im Wald (BZE I)

3 Zweite Bodenzustandserhebung im Wald (BZE II)

4 Bodenzustandserhebung Landwirtschaft (BZE-L)

5 Boden-Dauerbeobachtung (BDF)

6 Landwirtschaftliche Dauerfeldversuche

7 Feldlysimeter

8 Agrarmeteorologische Daten des Deutschen Wetterdienstes (insbesondere Bodendaten)

9 Umweltprobenbank des Bundes (Probenart Boden)

10 Bodenschätzung (Karten und Messdaten)

Karten

11 Themenkarten des Bundes und der Länder (LABO-BOVA 2006)

12 Nutzungsdifferenzierte BÜK 1.000

13 BÜK 200

14 Karte der Bodenarten von Oberböden Deutschlands

15 Karte der Gehalte an organischer Substanz in Oberböden Deutschlands

Projekte mit Datenerhebungen

16 BIOSOIL Demonstration Project

17 Further Development and Implementation of an EU-Level Forest Monitoring System (FutMon)

18 Zusammenfassung weiterer Projekte mit Erhebungen von Bodendaten (CarboEurope, BIOKLIM, LUCAS, DFG-Exploratorien, TERENO, Humusmonitoring Ackerflächen NRW)

Die Steckbriefe enthalten jeweils:

- Allgemeine Angaben zum Messprogramm oder Karten(werk)

1. Bezeichnung
2. Kurzbezeichnung
3. Art der Datenquelle
4. Räumliche Ausdehnung / Gebiet
5. Bestandteile
6. Stand der Daten oder Erhebungszeitraum
7. Darstellungsmaßstab (für Karten)
8. Koordinatensystem (für Karten)
9. Ziele der Erhebung / der Kartendarstellung

- Angaben zur räumlichen Verteilung bzw. Abdeckung

10. Anzahl Untersuchungsstandorte (für Messdaten)
11. Räumliche Verteilung der Untersuchungsstandorte (für Messdaten)
12. Karte der Untersuchungsstandorte (für Messdaten) oder Räumliche Übersicht (für Karten)

- Angaben zu enthaltenen Parametern und Methoden

13. Untersuchungsparameter (für Messdaten) und/oder Darstellungsparameter (für Karten)
14. Untersuchungshäufigkeit (für Messdaten)
15. Probenahme- und Analysemethoden (für Messdaten) und/oder Ableitungs- und Regionalisierungsmethoden (für Karten)
16. Methodendokumentation (Konzept, Technik)
17. Probenahmedesign (für Messdaten)

- Angaben zu Anwendung und Organisation

18. Anwendungsbereiche
19. Anwender der Ergebnisse
20. Erhebende Institution(en) und deren Aufgaben
21. Weitere Beteiligte und deren Aufgaben
22. Arbeitsgruppen / Gremien
23. Datenhaltung – Institution(en)
24. Datenhaltung – Technik
25. Datenverfügbarkeit

26. Verknüpfung mit anderen Messnetzen
27. Wichtigste Quellen und Publikationen

- Angaben zur Anwendung der Daten in der Klimaforschung und -anpassung

28. Vorteile der Datenquelle für die Anwendung in der Klimaforschung und -anpassung
29. Nachteile der Datenquelle für die Anwendung in der Klimaforschung und -anpassung
30. Klimafolgenrelevante Forschungsergebnisse

Ein Entwurf der Steckbriefe für Bodendaten wurde als eigenständiger Bericht „Mess- und Erhebungsaktivitäten für Böden in Deutschland – Bodendaten für Fragen zu Klimawandel, Klimafolgen und Anpassung“ angefertigt und im Rahmen des UBA-Workshops „Anwendung von Bodendaten bei der Klimaanpassung“ am 29./30.09.2009 vorgestellt (AHU AG 2009)[1]. Im Nachgang zum Workshop gingen beim Umweltbundesamt zahlreiche Ergänzungsvorschläge und Anmerkungen zu den Steckbriefen ein. Vor diesem Hintergrund sind in 2011 eine Aktualisierung der Steckbriefe und ihre Veröffentlichung in einer UBA-Broschüre geplant.

Einordnung von Bodendaten und Untersuchungsansätzen

Bodendaten können grundsätzlich eingeteilt werden in:

1) Messdaten für den Bodenzustand (gemessen am Punkt / Standort)
   a) Zeitabhängige, dynamische Variablen (z.B. Bodentemperatur, Wassergehalt, pH)
   b) Weitgehend zeitunabhängige, (quasi-)statische Variablen (z.B. physikalische Bodeneigenschaften)
2) Räumliche Daten (Karten zum Bodenzustand und thematische Karten)

Zur Untersuchung von Veränderungen der Böden bieten sich unterschiedliche wissenschaftliche Ansätze mit jeweils verschiedene Stärken und Schwächen an (vgl. Tab. 3.1).

[1] Der Entwurf der Broschüre wurde auch auf der Projekthomepage veröffentlicht.

Tab. 3.1: Nutzen und Herausforderungen von fünf Ansätzen zur Untersuchung von Veränderungen der Böden
(nach Richter et al. 2007, Soil Sci. Soc. Am. J. 71:266-279, verändert)

Ansatz	**Zeitskala [a]**	**Nutzen und Stärken**	**Herausforderungen und Einschränkungen**
Kurzfristige Boden-Experimente	< 1 – 10	Feld oder Labor, Basis experimenteller Kontrolle, vielseitig, kurzfristige Prozesse	Extrapolation auf größeren Skalen von Raum und Zeit erforderlich, vereinfacht
Langfristige Boden-Experimente und Monitoring	> 10	feldbasiert, direkte Beobachtung des Bodens, experimentelle Kontrolle, Beweissicherung, Probenarchiv	Planung und operative Details, langer Zeitraum, bis nutzbare Daten vorliegen, anfällig für Standortverlust oder -vernachlässigung, Extrapolation auf größeren Skalen erforderlich
Wiederholte Bodenzustandserhebungen (Inventuren, soil surveys)	> 10	feldbasiert, direkte Beobachtung des Bodens, Regionalisierbarkeit, Probenarchiv	Planung und operative Details, keine kontinuierliche Beobachtung
Chronosequenzen* (space-for-time-substitution)	> 10 to >> 1.000	feldbasiert, sehr zeiteffizient	Hypothetisch, nicht prüfbar
Computergestützte Modelle	< 1 to >> 1.000	vielseitig, heuristisch, voraussagend, interagieren mit anderen Ansätzen	Näherungsweise, abhängig von Beobachtungsdaten

* Beobachtung einer Abfolge verschiedener Bodentypen im Laufe der Bodenentwicklung

Der Begriff Monitoring wird in DIN ISO 16133 (2006-06) definiert als der „für festgelegte Zwecke erfolgender Prozess der wiederholten Beobachtung von einem oder mehreren Elementen der Umwelt, entsprechend den vereinbarten Programmen in Raum und Zeit, unter Verwendung vergleichbarer Verfahren der Umweltmessung und Datenerhebung."

Bei der als Monitoring angelegten Boden-Dauerbeobachtung sind Basisuntersuchungen zur Erfassung von Veränderungen der Bodenmerkmale von prozessorientierten Intensiv-Beobachtungen zu unterscheiden.

Daten im Fokus

Im Fokus des BOKLIM-Vorhabens stehen die bundesweit betriebenen Programme des Bodenmonitoring und der Bodenzustandserhebung im Umwelt-, Forst- und Landwirtschaftsbereich, aus denen heute bereits bodenbezogene Messdaten vorliegen:

- ICP Forest (Level I und II)
- Bodenzustandserhebung im Wald
- Boden-Dauerbeobachtung
- landwirtschaftliche Dauerfeldversuche

Diese sind dem Monitoring und den langfristigen Boden-Experimenten (ICP Forest Level II, Boden-Dauerbeobachtung und Dauerfeldversuche) sowie den Wiederholungsinventuren (Bodenzustandserhebung im Wald, ICP Forest Level I) zuzuordnen. Obwohl die landwirtschaftlichen Dauerfeldversuche nicht vollständig der o.g. Monitoring-Definition entsprechen, werden sie im Weiteren vereinfachend unter dem Begriff „Bodenmonitoring“ aufgeführt.

Nachrangig wurden bei der Dateneignungsprüfung aber auch weitere langfristige Boden-Beobachtungsaktivitäten und ausgewählte Karten(werke) berücksichtigt:

- Bodenzustandserhebung Landwirtschaft
- Agrarmeteorologische Bodendaten des DWD
- Probenart Boden der Umweltprobenbank des Bundes
- Feldlysimeter
- Bodenübersichtskarten
- Bodenschätzung

Abbildung 4.2 zeigt die betrachteten bundesweit laufenden Messaktivitäten für Böden mit Bezug zu den beteiligten Verwaltungsebenen und der Messintensität. Der nachfolgende Kasten enthält eine Kurzbeschreibung der Programme, die im vorliegenden Bericht im Fokus stehen.

		Anzahl Standorte Deutschland
International	ICP Forest, Large Scale-Untersuchungen (Level I)	ca. 420
	ICP Forest, Intensiv-Untersuchungen (Level II)	88
Bund / Länder	Bodenzustandserhebung Wald (BZE Wald)	1.950
	Bodenzustandserhebung Landwirtschaft (BZE Landwirtschaft)	ca. 4.000
	Basis-Boden-Dauerbeobachtung (Basis-BDF)	699
	Intensiv-Boden-Dauerbeobachtung (Intensiv-BDF)	92
	Agrarmeteorologische Daten des Deutschen Wetterdienstes (DWD)	ca. 500
	Umweltprobenbank des Bundes - Probenart Boden	11
Forschung	Landwirtschaftliche Dauerfeldversuche (LWF)	ca. 30
	Feldlysimeter	45

Basis-Erhebung Intensiv-Erhebung

Abb. 3.2: Übersicht laufender bodenbezogener Messaktivitäten in Deutschland

Programme des Bodenmonitoring und der Bodenzustandserhebung in Deutschland

ICP Forest Level I / BZE Wald, ICP Forest Level II

Die Messungen auf Forststandorten im Rahmen des ICP Forest Level I / BZE Wald und ICP Forest Level I sind ausgerichtet auf die Bewertung und Überwachung des Waldzustands sowie des Zustands der Waldböden mit Blick auf Waldernährung, Kronenzustand und Wasserqualität. Die Einrichtung und der Betrieb der Messstandorte, ein Mindestparametersatz sowie die Untersuchungs- und Dokumentationsmethoden sind im Rahmen der Bund-/Länder-Arbeitsgruppe BZE vereinbart. Die ca. 420 Standorte des ICP Forest Level I liegen in einem 16 x 16 km-Raster und werden durch weitere Standorte der Bodenzustandserhebung im Wald in einem 8 x 8 km-Raster ergänzt (insgesamt ca. 2000 Standorte). Wiederholte Inventuren sind ca. alle 15 Jahre vorgesehen. Die 88 Level II-Standorte sind so verteilt, dass sie die Hauptwaldtypen Deutschlands repräsentieren. Der Parameterumfang der Bodenuntersuchungen ermöglicht insbesondere Auswertungen zum Bodenzustand zum Zeitpunkt der Erhebung in Bezug auf den Kohlenstoffkreislauf, den Nährstoff- und Wasserhaushalt und die diffuse stoffliche Bodenbelastung. Daten zur Bestockung liegen ausschließlich für die Beprobungstermine vor. Informationen zu Kalkungsmaßnahmen u.ä. zwischen den Beprobungsterminen fehlen. Das vTI - Institut für Waldökologie und Waldinventuren (WOI) hält die Daten in einer zentralen Datenbank. Ein Bundesdatensatz wird 2015 zur Verfügung stehen.

BZE Landwirtschaft

Vom Bundeslandwirtschaftsministerium (Johann Heinrich von Thünen Institut, Bundesforschungsinstitut für Ländliche Räume, Wald und Fischerei, Institut für Agrarrelevante Klimaforschung) wird aktuell eine bundesweite Bodenzustandserhebung (BZE) Landwirtschaft für die Klimaberichterstattung in Kooperation mit den Ländern konzipiert. Wie in der BZE Wald ist eine bundesweite, rasterbasierte Stichprobe zur Charakterisierung der Böden und der Landnutzung und Bewirtschaftung geplant. Der Untersuchungsumfang unterscheidet sich von der BZE Wald. Das Programm umfasst eine Untersuchung des aktuellen Kohlenstoffstatus und dessen künftige Veränderungen der landwirtschaftlich genutzten Böden Deutschlands. Die Inventur wird zentral koordiniert und nach einheitlichen Methoden durchgeführt. Die rund 4000 Messstandorte liegen in einem 8 x 8 km-Raster. Flächendeckende Daten, die zunächst den Ist-Zustand der Böden beschreiben werden, sind voraussichtlich erst in mehr als 5 Jahren verfügbar.

Boden-Dauerbeobachtung

Die Boden-Dauerbeobachtung ist explizit auf den vorsorgenden Bodenschutz ausgerichtet, um schädliche Bodenveränderungen anhand langjähriger Zeitreihen frühzeitig erkennen zu können. Die Einrichtung und der Betrieb der Messflächen sind in den Landesbodenschutzgesetzen verankert. Durch die länderübergreifenden Arbeiten seit den 1990er Jahren zur fachlichen Abstimmung und die Berücksichtigung von konzeptionellen und methodischen Empfehlungen durch die Länder konnte bislang eine weitgehend länderübergreifende Vereinheitlichung der Vorgehensweise bei der Auswahl, Einrichtung und Betrieb der BDF im Rahmen der Boden-Dauerbeobachtungsprogramme gewährleistet werden. Verbindliche Vereinbarungen zu Untersuchungsmethoden sowie zum datenverarbeitungstechnischen Austausch und zur Einheitlichkeit der Daten existieren jedoch nicht. Die Daten werden in den Ländern verwaltet. Im Fachinformationssystem Bodenschutz (bBIS-UBA) werden Daten der Basis-BDF für länderübergreifende Auswertungen zusammengeführt. Die räumliche Verteilung der ca. 700 Basis- und 95 Intensiv-BDF ist je nach Bundesland unterschiedlich. In der Regel richtet sich die Standortwahl nach der Landschaftsrepräsentanz. Die Basis-BDF werden vielfach im 10-Jahresturnus untersucht und liefern Messdaten zu Merkmalen des Bodenzustands. Es erfolgt eine umfassende und wiederholte Erhebung von biologischen, chemischen und physikalischen Bodeneigenschaften. Parallel wird die Bewirtschaftung erfasst (Nutzungsgeschichte, Stoffein- und -austräge, Bodenbearbeitung, Erträge usw.). Die Intensiv-BDF sind mit dauerhaften Messeinrichtungen ausgestattet, um insbesondere dynamische Bodenprozesse zu dokumentieren, z.B. Stoffeinträge durch Deposition und Stoffausträge mit dem Sickerwasser.

Landwirtschaftliche Dauerfeldversuche

Die landwirtschaftlichen Dauerfeldversuche mit einer Versuchdauer von mehr als 30 Jahren werden derzeit an 19 Standorten in Deutschland durchgeführt und dienen in der Regel zur Beantwortung von Fragestellungen der landwirtschaftlichen Ertragsabhängigkeit, teilweise auch zur Untersuchung von langfristigen bewirtschaftungs- und klimabedingten Veränderungen von Bodeneigenschaften. Die Standorte erstrecken sich von Südwest- nach Nordostdeutschland und decken Sand-, Löss- und Lehmböden mit jährlichen Niederschlagsmengen von 480 bis 900 mm ab. Die Einrichtung und der Betrieb der einzelnen Dauerfeldversuche obliegen keinem zentralen Organ. Vielmehr ist dies Aufgabe von agrarwissenschaftlichen Forschungseinrichtungen des Bundes und der Länder sowie von Universitäten. Derzeit erfolgt in Deutschland noch keine zentrale konzeptionelle und methodische Koordination; diese wird jedoch angestrebt. Untersucht werden im Boden i.d.R. Eigenschaften wie Humus- und Nährstoffgehalte und –vorräte, physikalische Bodeneigenschaften wie Dichte und Wasserhaushalt sowie in einigen Fällen bodenbiologische Parameter. Die Untersuchungshäufigkeit variiert an den einzelnen Standorten.

Nutzen und Eigenschaften der Programme

Die Programme verfolgen jeweils unterschiedliche nutzungs- und umweltbezogene **Ziele**. Sie wurden i.d.R. ursprünglich nicht dazu eingerichtet, den Einfluss von geänderten Klimabedingungen auf Böden zu untersuchen. Der Umfang gemessener Parameter ist im stofflichen Bereich am größten (Humus, Kohlenstoff, Nähr- und Schadstoffe) und am geringsten in der Bodenphysik und Bodenbiologie. Häufig werden auch andere Umweltkompartimente wie Aufwuchs und Grundwasser in die Messungen einbezogen.

Hinsichtlich der **Laufzeiten** verfügen die landwirtschaftlichen Dauerfeldversuche über die längsten Messreihen (> 30 Jahre). Die Boden-Dauerbeobachtung in einigen Ländern und die forstlichen Monitoring- und Erhebungsprogramme werden seit den 1980er Jahren betrieben. Die erste bundesweite Zustandserhebung für landwirtschaftlich genutzte Böden wird derzeit vorbereitet.

Beteiligt an der Durchführung der Programme und Aktivitäten sind Verwaltungseinrichtungen in den Ressorts Umwelt, Forst, Landwirtschaft und Wirtschaft sowie Forschungseinrichtungen und Universitäten. Der Betrieb von Messflächen der Boden-Dauerbeobachtung und der forstlichen Monitoring- und Erhebungsprogramme liegt in der Zuständigkeit der Länder. Die landwirtschaftlichen Dauerfeldversuche sind an landwirtschaftlichen Forschungseinrichtungen des Bundes und der Länder sowie an Universitäten angesiedelt. Die Analytik erfolgt zumeist in landeseigenen oder teilweise in privaten zertifizierten Laboren.

Die **Untersuchungshäufigkeit** variiert – je nach Dynamik des untersuchten Prozesses – zwischen 10 Jahren und stündlich. In den Programmen des Bodenmonitoring und der Bodenzustandserhebung werden nicht durchgehend einheitliche oder gleichwertige Probenahme- und Untersuchungsverfahren eingesetzt.

Die **Messstandorte** verteilen sich über die gesamte Fläche der Bundesrepublik Deutschland. Unterschieden werden rasterbasierte Messnetze z.B. im 16 x 16 km- bzw. 8 x 8 km-Raster (ICP Level I/BZE Wald, BZE Landwirtschaft) von Programmen mit ausgewählten, für einen definierten Raum repräsentativen Messstandorten (z.B. repräsentativ für eine Bodengesellschaft) (Basis-BDF, Intensiv-BDF, LWF, ICP Level II). Sind die Standorte von Messnetzen repräsentativ für einen definierten Raum, ist eine Übertragung von Punktinformationen in die Fläche möglich.

Eine zentrale **Datenhaltung** erfolgt nur in einem Teil der Programme (z.B. ICP Level I/BZE Wald, BZE Landwirtschaft, Basis-BDF). Die verwendeten Formate und Informationssysteme zur Datenhaltung und -bereitstellung sind unterschiedlich und nicht ohne weiteres übertragbar. Messdaten sind teilweise auf Anfrage verfügbar und können für Auswertungen oder Modellierungen genutzt werden. Einheitliche Nutzungsvereinbarungen existieren nicht.

Koordinierende Aktivitäten finden in unterschiedlichem Maße statt. Im forstlichen Bereich sind ständig eingerichtete Gremien (Expert Panels und Working Groups im Rahmen von ICP Forest Level I und II, Bund-Länder-Arbeitsgruppe BZE II, BMELV-Gutachterausschuss Forstliche Analytik GAFA) mit der Organisation, Auswertung und Weiterentwicklung der Programme befasst. Anstrengungen zur Abstimmung und Koordination werden auch für Boden-Dauerbeobachtung und landwirtschaftliche Feldversuche unternommen, es bestehen jedoch keine ständigen Gremien oder langfristige Vereinbarungen. Messnetz-übergreifende Netzwerke bestehen nicht.

Verknüpfungen zwischen Messprogrammen bestehen zwischen ICP Level I/BZE Wald, ICP Level II und BDF. So sind beispielsweise in Bayern, Baden-Württemberg, Niedersachsen und Nordrhein-Westfalen die Boden-Dauerbeobachtungsflächen zum Teil an Level II-Standorte angeschlossen. Teils findet eine integrierende Beobachtung von Umweltkompartimenten statt.

Fazit:

Die meisten bis hier beschriebenen Programme des Bodenmonitoring und der Bodenzustandserhebung wurden ursprünglich mit Zielen der Luftreinhaltung, Waldbewirtschaftung oder des Bodenschutzes angelegt. Nur die derzeit beginnende Bodenzustandserhebung Landwirtschaft mit ihrem auf Kohlenstoff begrenzten Untersuchungsumfang war von Beginn an auf Klimafragestellungen ausgerichtet. Die Programme arbeiten in unterschiedlichem Maße nach zwischen den Beteiligten abgestimmten Grundsätzen, Vorgehensweisen und Methoden. Besonders weitgehend ist die Vereinheitlichung der Probenahme- und Analysemethoden bei der bundesweit organisierten Bodenzustandserhebung im Wald und den ICP Level II-Flächen vorangeschritten. Die Boden-Dauerbeobachtungsprogramme sind landesintern und aufgrund von Aktivitäten auf LABO-Ebene ebenfalls stark standardisiert.

Die Abdeckung der Fläche mit Untersuchungsstandorten ist je nach Programm unterschiedlich (siehe Abb. 3.3). Im Überblick deutet sich an, dass im Rahmen der bestehenden Programme gut untersuchte Messstandorte in allen Klimaregionen Deutschlands vorhanden sind, die Standortdichte jedoch ungleichmäßig ist. Der Untersuchungsumfang (Parameter, Häufigkeit) und die Methodik ist an den Standorten der einzelnen Programme und zum Teil auch je nach Bundesland und Feldversuchsstandort unterschiedlich. Hiervon hängen die Anwendungspotenziale der Messdaten jeweils im Einzelnen ab. Die unterschiedliche Vorgehensweise in den Programmen führt dazu, dass bundesweite Aussagen für die Berichterstattung zum Bodenzustand und dessen Veränderungen gar nicht oder nur mit sehr hohem Aufwand abgeleitet werden können.

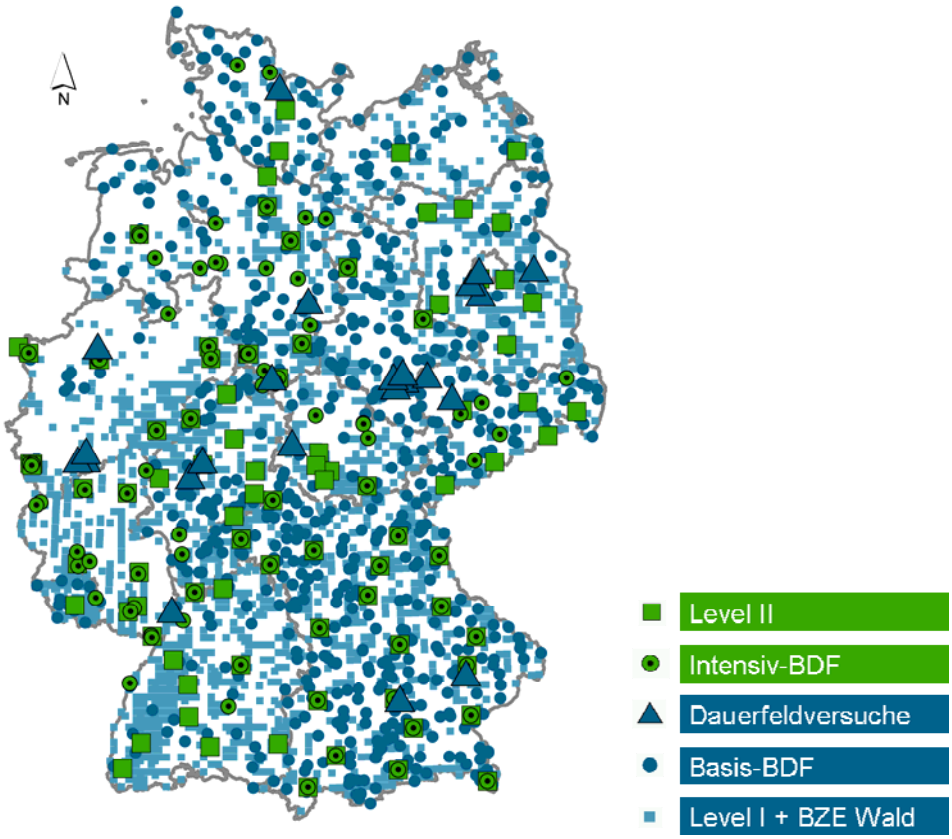


Abb. 3.3: Messstandorte von Bodenmonitoring und Bodenzustandserhebung (ohne geplante Standorte der BZE Landwirtschaft)
Datengrundlagen: UBA, vTI, LGB RLP. Stand 12/2010

Weitere Messaktivitäten

Das agrarmeteorologische Messprogramm des Deutschen Wetterdienstes (DWD) liefert zumeist seit den 1960er Jahren Messreihen zu Bodenfeuchte und Bodentemperatur an repräsentativen Messstandorten.

Die Umweltprobenbank (UPB) des Bundes wird unter der Gesamtverantwortung des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherung betrieben. Die (UPB) ist ein Archiv von Proben, mit denen die Qualität der Umwelt dokumentiert und bewertet werden kann. Durch die Tiefkühllagerung von Bodenproben in der UPB ist grundsätzlich die Möglichkeit gegeben, über einen langen Zeitraum vielfältige Informationen über den Bodenzustand, die stoffliche Belastung sowie über seine Funktionsfähigkeit als Lebensraum und damit auch über die Artenvielfalt und mögliche Veränderungen zu konservieren. Seit 2002 werden routinemäßig an elf ausgewählten Standorten Bodenproben entnommen.

In Deutschland werden durch Universitäten und Forschungseinrichtungen derzeit 45 Feldlysimeter mit unterschiedlichen hydrologischen und stofflichen Forschungsansätzen dauerhaft betrieben. Diese Untersuchungen reichen zum Teil bis in die 1950er Jahre zurück.

Neben den oben dargestellten Programmen werden in den Bundesländern weitere Erhebungen des Bodenzustands durchgeführt, z.B. zur Ermittlung landesweiter Hintergrundwerte für Schadstoffe in Böden. Weiterhin werden z.T. auf Europäischer Ebene bzw. in einzelnen Ländern – in diversen Projekten Boden- und Landnutzungsdaten erhoben (z.B. CarboEurope, LUCAS, DFG-Exploratorien, TERENO, Humusmonitoring NRW).

Rechtliche Anforderungen zur Überwachung des Bodenzustands

Eine bundesweite rechtliche Verpflichtung zur Überwachung des Bodenzustands im Bodenschutzrecht existiert nicht expressis verbis:

Im Rahmen des seit 1998 gesetzlich festgeschriebenen Bodenschutzes (Bundes-Bodenschutzgesetz § 21 (4)) können insbesondere Daten von Dauerbeobachtungsflächen und Bodenzustandsuntersuchungen über die physikalische, chemische und biologische Beschaffenheit des Bodens und über die Bodennutzung in Bodeninformati-

onssystemen erfasst werden, die von den Ländern eingerichtet und geführt werden können. Auch der Bund kann dem Gesetz nach ein Informationssystem für Bundesaufgaben einrichten (§ 19 (2)). Soweit eine Datenübermittlung zwischen Bund und Ländern zur Erfüllung von Bodenschutzaufgaben notwendig ist, wird diese auf der Grundlage einer Verwaltungsvereinbarung zwischen Bund und Ländern über den Datenaustausch im Umweltbereich (VwV Datenaustausch; Anhang Boden) geregelt. Mit der Europäischen INSPIRE-Richtline (Infrastructure for Spatial Information in Europe, 2007/2/EG) und dem im Februar 2009 verabschiedeten deutschen Geodatenzugangsgesetz bestehen neue Anforderungen zum Aufbau der nationalen Geodateninfrastruktur und unter anderem zu Daten zu den Themenfeldern Bodenbedeckung, Boden und Bodennutzung. Hierzu fehlen bislang konkrete Festlegungen der zu erhebenden Parameter und in Bezug auf die Formen der Zusammenarbeit und des Datenaustauschs.

Gleichwohl richteten die meisten Bundesländer (außer Berlin und Bremen) ein Netz von Boden-Dauerbeobachtungsflächen ein und es werden in unterschiedlichen Abständen Erhebungen des Bodenzustands durchgeführt (s.o.). Auf Basis von Flächendatenbanken werden Auswertungen zu Funktionen und Potenzialen, aber auch zu Belastungen der Böden durchgeführt. Die Ergebnisse der Auswertungen werden in sogenannten Themenkarten des Bundes und der Länder mit unterschiedlichen Maßstäben und Kartengrundlagen visualisiert. Die Bodeninformationssysteme dienen dazu, die geowissenschaftlichen Grundlagen für eine nachhaltige Sicherung der Funktionen des Bodens bereitzustellen und stellen einen zentralen Datenpool für Behörden und die Öffentlichkeit dar.

Auch aus weiteren gesetzlichen Regelungen, wie z.B. aus der FFH-Richtlinie (92/43/EWG), der EU-Wasserrahmenrichtlinie (2000/60/EG) oder der Biomassestrom-Nachhaltigkeitsverordnung (BioSt-NachV) ergeben sich keine expliziten Anforderungen zur Überwachung der Böden. Allerdings wird im Rahmen des FFH-Monitoring der Boden in Zusammenhang mit der Vegetation betrachtet und im Zusammenhang mit der BioSt-NachV sind Bodendaten (nutzungsabhängiger Kohlenstoffgehalt) zur Berechnung des sog. Treibhaus-Minderungspotenzials erforderlich. Im Rahmen von Cross Compliance sind gemäß Direktzahlungen-Verpflichtungengesetz und -verordnung Prämienzahlungen für Landwirte mit der Einhaltung von Umweltstandards verknüpft. Hier ist unter bestimmten Voraussetzungen die regelmäßige Untersuchung des Bo-

dens auf die Gehalte von Humus, Stickstoff, pflanzenverfügbarem Phosphat, Kali und Magnesium sowie pH-Wert vorgeschrieben, sofern keine Fruchtfolge mit positiver oder ausgeglichener Bilanz gegeben ist. Bei dieser lokalen Überprüfung des Bodenzustands werden jedoch keine flächenrepräsentativen, kontinuierlichen Zeitreihen für Bodeneigenschaften erzeugt und die Daten sind in der Regel nicht zugänglich.

Räumliche Daten

Neben den auf Bodenzustand und dessen Veränderungen ausgerichteten Messaktivitäten liegen in Bund und Ländern umfangreiche Flächendaten zu Bodeneigenschaften auf unterschiedlichen Maßstabsebenen vor. Eine Auflistung der vorliegenden Themenkarten findet sich in LABO-BOVA (2006); diese ist im Entwurf der Broschüre „Mess- und Erhebungsaktivitäten für Böden in Deutschland“ (AHU AG 2009) enthalten.

Bodenkundliche Karten und Profildaten sowie geologische Karten für den Untergrund unterhalb des Bodens stehen i.d.R. bei den Geologischen Diensten oder Umwelt, Landwirtschafts- und Forstbehörden der Länder zur Verfügung. Bodenkarten zeigen die Verbreitung von in einem Gebiet vorherrschenden Böden und deren Eigenschaften. Über so genannte Pedotransferfunktionen oder Modelle lassen sich daraus Aussagen zur Ausprägung der entsprechenden Bodenfunktionen sowie mögliche Bodengefährdungen ableiten. Die Bodenschätzung beinhaltet umfassende Flächen- und Punktdaten, die in den Ländern zunehmend flächendeckend und digital verfügbar werden (siehe nachfolgender Kasten).

Bodenschätzung

Aufbauend auf einem Netz von rund 4.100 Musterprofilen (Musterstücke) sowie dem Schätzungsrahmen für Acker- und Grünland wird im Rahmen der Bodenschätzung die Beschaffenheit und die Ertragsfähigkeit der landwirtschaftlich nutzbaren Böden erfasst (BGBl. 2007 Teil I Nr. 69 S. 3176 – 3183). Für die Musterstücke liegen neben dem Schätzungsergebnis auch bodenphysikalische und bodenchemische Analysedaten vor. Dasselbe gilt zunehmend für die Vergleichsprofile auf Gemarkungsebene (Vergleichsstücke), die in einigen Bundesländern gemeinsam mit der bodenkundlichen Landesaufnahme bewertet werden. Die Masse an auswertbaren Bodenprofilen aus der flächendeckenden Schätzung umfasst mehrere Millionen Bodenprofile (Grablöcher), weil prinzipiell für jede abgegrenzte Bodenfläche eine Profilbeschreibung angelegt wird. Werden die ursprünglichen Bohrungen, die der Flächenbildung zugrunde liegen, mit in die Betrachtung einbezogen, basiert die Bodenschätzung deutschlandweit auf einem Fundus von ca. 100 Mio. Stichproben (40 x 40 m-Bohrraster auf 17 Mio. ha). Bodenschätzungsdaten liegen deutschlandweit einheitlich vor. Da die Bodenschätzung kontinuierlich fortgeführt wurde, liegen ältere und neuere Aufnahmen nebeneinander vor, sodass bei Auswertungen das Aufnahmedatum zu beachten ist. Die räumlichen Grenzen der Bodenflächen und die Lage der Grablöcher werden im amtlichen Liegenschaftskataster nachgewiesen. Bodenschätzungsdaten sind dabei zunehmend digital verfügbar und perspektivisch Bestandteil des Liegenschaftskatasterinformationssystems ALKIS®. Parallel dazu halten Bodenschätzungsdaten und deren themenbezogene Auswertungen Einzug in die Geodatenserver der Länder, wodurch sie letztendlich Bestandteile der deutschen und europäischen Geodateninfrastruktur sind.

Ergebnisse aus der Arbeit mit Daten aus Bodenmonitoring und Bodenzustandserhebung

Aus der Auswertung von Daten der bestehenden Programme des Bodenmonitoring und der Bodenzustandserhebung liegen bereits Ergebnisse, z.B. zu folgenden Themen, vor [2]:

- Entwicklung des Kohlenstoffpools der Waldböden (Level I+II, BZE Wald) und landwirtschaftlich genutzte Böden, Mechanismen der Humusstabilisierung, Erkenntnisse zur Humusbilanzierung (Reduzierung der CO2-Belastung in der Atmosphäre) (LWF)
- Verbesserung der Grundlagen für die Wasserhaushaltsmodellierung (Level I+II, BZE Wald)
- Wirkung von Luftschadstoffeinträgen und Klimawandel auf Stoffumsetzungen in Waldökosystemen sowie auf die Vitalität und Vielfalt der Waldvegetation (Level II)
- Bewertung der Verdunstung in landwirtschaftlichen Produktionsgebieten (DWD)
- Auswirkungen des Klimawandels auf die phänologischen Phasen wildwachsender Pflanzen in Sachsen-Anhalt (DWD-Bodendaten)
- Synergien zwischen Moorschutz und Klimaschutz aufgrund der Kohlenstoffspeicherung in Mooren (BDF)
- Wechselwirkung zwischen Bodennutzung und klimarelevanten Spurengasen (LWF)
- Einfluss von Klimaänderungen auf das System Boden-Pflanze und zu den Wechselbeziehungen zwischen Boden und Klima, Sensibilitätsabschätzung landwirtschaftlicher Kulturpflanzen auf zu erwartende Klimaänderungen, Modellierung von Pflanzenwachstum (LWF)
- Atmogener Eintrag von Stickstoff (LWF)
- Einfluss unterschiedlicher Bewirtschaftung auf die mikrobielle Diversität im Boden (LWF)

---

[2] Die nachfolgende Liste fasst das Ergebnis einer Messnetz- und themenübergreifenden Recherche und Mitteilungen von an den Messprogrammen beteiligten Institutionen zusammen.

- Ableitung von Referenzwerten für die faunistische Biodiversität im Boden (BDF)
- Ableitung entscheidender Kennziffern zur Bewertung der Umweltverträglichkeit differenzierter Landnutzungsintensitäten (LWF)

Für weitere Informationen zu den Bodendaten und Messprogrammen sowie für Publikationen zu den genannten Ergebnissen von Datenauswertungen wird auf die UBA-Broschüre „Mess- und Erhebungsaktivitäten für Böden in Deutschland“ (voraussichtlich 2011) und die für das jeweilige Messprogramm verantwortlichen Institutionen verwiesen.

3.1.2 Datenbedarf für Klimasystem-, Klimafolgen- und -anpassungsforschung

C. Kaufmann-Boll; B. Tischler

Das in Kapitel 3.1.1 beschriebene Datenangebot aus bodenbezogenen Monitoring- und Erhebungsprogrammen wird mit dem Datenbedarf der Klimasystem-, Klimafolgen und -anpassungsforschung abgeglichen, um die Eignung der benötigten Daten zu beurteilen und Vorschläge für eine effiziente Datenbereitstellung zu entwickeln. Die Ausführungen zum Datenbedarf wurden mit freundlicher Unterstützung von Vertretern der BTU Cottbus, des Max-Planck-Instituts für Meteorologie (MPI-M) in Hamburg, des Landesamtes für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume (LLUR) Schleswig-Holstein, des Landesamtes für Geologie und Bergwesen Sachsen-Anhalt und des Johann Heinrich von Thünen-Instituts (vTI) in Braunschweig erarbeitet.

Klimasystemforschung

Unter Klimasystemforschung wird hier die Erforschung des Klimas und seiner Veränderungen verstanden. Dabei spielt der Boden im Hinblick auf die Wechselwirkungen von Boden und Atmosphäre (Stoff- und Energieaustausch) eine besondere Rolle. Sowohl der Boden als auch die von der Landnutzung abhängige Vegetation haben einen erheblichen Einfluss auf atmosphärische Prozesse.

Mit Ausnahme eines Bundeslandes setzen alle Bundesländer regionale Klimamodelle zur Klimaprojektion ein. Die Mehrzahl der Bundesländer (13) verwendet die zwei regionalen Klimamodelle REMO (dynamisches Modell) und WETTREG (statistisches Modell). Das statistische Modell STAR des Potsdam-Instituts

für Klimafolgenforschung kommt in sechs Ländern zum Einsatz, während das derzeit noch in Entwicklung befindliche dynamische Modell CLM in vier Bundesländern eingesetzt wird.

Drei Bundesländer verwenden alle vier deutschen regionalen Klimamodelle für die Klimaprojektion. Mit einer Ausnahme setzen alle Bundesländer SRES[3]-Emissionsszenarien im Rahmen der Klimaprojektion ein (zumeist Szenario A1B, das der derzeitigen weltweiten Entwicklung am nächsten kommt) (BUND-/LÄNDER-ARBEITSGEMEINSCHAFT „KLIMA, ENERGIE, MOBILITÄT – NACHHALTIGKEIT“ 2008). In dem „Regional Climate Modeling and Downscaling“ (RCD)-Projekt CORDEX (A COordinated Regional climate Downscaling EXperiment) werden bereits neuere Szenarien verwendet, in die mehr und komplexere Parameter einfließen (z.B. Szenarien mit unterschiedlichen Treibhausgaskonzentrationen). Die Arbeiten in CORDEX basieren auf der neuesten Reihe der GCM (Global Climate Model)-Klimaszenarien und –vorhersagen, die innerhalb der 5th Coupled Model Intercomparison Project (CMIP5) erarbeitet wurden. Im folgenden Kasten werden sowohl regionale als auch ein globales Klimamodell näher beschrieben, in denen bestimmte Bodenparameter und -prozesse für Prognosen eine Rolle spielen.

In der Klimasystemforschung werden Bodendaten benötigt, um Klimamodelle zu initialisieren, zu validieren und weiterzuentwickeln. Hierfür relevant sind sowohl zeitabhängige Beobachtungsdaten aus möglichst langjährigen Messreihen von dynamischen Variablen (Bodentemperatur , -wasser- und -eisgehalt, pH-Wert usw.), Bodendaten, die die räumliche Verteilung von Böden und Landnutzung beschreiben (z.B. Bodenkarten) sowie Daten zu physikalischen (und chemischen) Bodeneigenschaften (z.B. Wärmeleitungskoeffizient), die bestimmte Klassen von Böden und Vegetation kennzeichnen. Das Modell COSMO-CLM verwendet beispielsweise für seine Berechnungen insgesamt 13 Parameter (Tab. 3.2), wobei vor allem die hydraulischen sowie thermischen Parameter für die Klimamodellierung erforderlich sind.

---

[3] Special Report on Emissions Scenarios

Bodenparameter/ Bodendaten in Klimamodellen

REMO: Das hydrostatische regionale Klimamodell REMO entwickelt vom Max-Planck-Institut für Meteorologie, Hamburg, ist ein atmosphärisches Zirkulationsmodell, das die relevanten physikalischen Prozesse dynamisch behandelt. Hierdurch werden insbesondere nicht-lineare Zusammenhänge berücksichtigt. Im Modell REMO ist der Boden insofern Bestandteil, als er bzw. die Meeresoberfläche die untere Grenze des Atmosphären-Modells darstellen. Die Landflächen werden durch ihre Höhe über NN, ihre Oberflächenbeschaffenheit, Rauhigkeit und Bodenbeschaffenheit beschrieben, wobei zu jedem Modellzeitschritt in REMO Bodentemperaturen für fünf Erdbodenschichten bis zu einer Tiefe von 10 m berechnet werden, ebenso wie eine repräsentative Bodenfeuchte. REMO ist ein Gitterpunktsmodell und liefert somit Ergebnisse auf einem Raster für das gesamte Simulationsgebiet. Auf den Landflächen wird zwischen nacktem Boden und vegetationsbedeckten Flächen unterschieden. Zu den berechneten Ausgabegrößen gehören die prognostischen Klimavariablen ebenso wie eine Vielzahl von weiteren Größen, wie z.B. die Bodenfeuchte, die Windverhältnisse in Bodennähe und der Wolkenbedeckungsgrad.

COSMO-CLM: Das Multi-Layer Boden und Vegetations-Modell TERRA ist das Bodenmodell des operationellen Vorhersagemodells COSMO des Deutschen Wetterdienstes bzw. COSMO-CLM der CLM-Community (Climate-Limited-areaModelling-Community). Das Modell beschreibt die Wasser- und Energieaustauschprozesse mit der Atmosphäre. Diese Austauschprozesse bilden die untere Grenze für den atmosphärischen Teil des Modells. Für die Berechnung der Wechselwirkung zwischen Böden und Atmosphäre werden Daten der Bodentemperatur und -feuchte benötigt. Aufgabe des Modells ist es, diese Größen für andere Zeiträume vorherzusagen. Dies geschieht, indem das Modell einen Gleichungssatz auflöst, der die verschiedenen thermischen und hydrologischen Prozesse im Boden bis zu einer vorgebbaren Tiefe beschreibt. Üblicherweise werden rund 10 Schichten bis zu einer Tiefe von 20 m verwendet. Das Klimamodell COSMO-CLM ist wie REMO ein regionales Modell und ist eine vereinheitlichte Modellversion für operationelle numerische Wettervorhersage (DWD und anderer nationaler Wetterdienste) und für regionale Klimamodellierung (CLM-Community).

ECHAM5: Das globale Klimamodell ECHAM5 betrachtet ebenfalls die vertikalen Austauschprozessen zwischen Erdoberfläche und Atmosphäre, wofür ein Boden- und Vegetationsmodell verwendet wird.

Tab 3.2: Bodenparameter im Klimamodell COSMO-CLM (nach DOMS et al. 2005)

Parametergruppen	Parameterarten
Hydraulische Parameter	Parameter aus Grundwassermodellen
	ungesättigte Leitfähigkeit nach Van Genuchten
	Gesättigte hydraulische Leitfähigkeit
Thermische Parameter	Wärmeleitfähigkeit
	Wärmekapazität
Sonstige	Bodenart
	Porenvolumenanteil
	Feldkapazität
	Wassergehalt, lufttrocken
	Minimale Infiltrationsrate
	Bodenkarte, hydrogeologische Karten
	Permanenter Welkepunkt

Viele der benötigten Daten sind bisher nicht hinreichend genau (insbesondere in größeren Tiefen) bekannt.

Aus den in Bund und Ländern vorliegenden Bodenkarten können in Verknüpfung mit Messdaten aus der Bodenzustandserhebung die benötigten rasterbasierten Bodendaten (z.B. Bodenfeuchte, Bodentemperatur) für das Bodenprofil in Tiefen bis 2 m unter Gelände abgeleitet werden. Der Untergrund in größerer Tiefe wird mit Hilfe geologischer Karten und Daten beschrieben. Die Ergebnisse und auch die Parametrisierung von hochauflösenden Bodenwasserhaushaltsmodellen (z.B. 40 m-Raster) können von Klimamodellen genutzt oder zur Verifizierung genutzt werden (FELDHAUS 2009, mündl. Mittlg.).

Im Rahmen einer regionalen Auswertung in Sachsen-Anhalt konnte das regionale Klimamodell COSMO-CLM auf eine Maßstabsebene von 1 km-Rastern durch eine Parametrisierung der in Tabelle 3.2 aufgelisteten Bodenkenngrößen, präzisiert werden. Als Datengrundlage wurden hierfür die Bodenübersichtskarte des Landes Sachsen-Anhalt in dem Maßstab 1 : 200.000 (BÜK 200), die Lithofazieskarte Quartär 1 : 50.000 (LKQ 50) und das Grundwasserkataster nach Menge und Beschaffenheit für das Land Sachsen-Anhalt herangezogen. Durch eine horizontale Differenzierung und eine vertikale Differenzierung des Bodenprofils bis in eine Tiefe von 16 m konnte in der Parameterbereitstellung für COSMO-CLM und vergleichbare Modelle eine Verbesserung erzielt werden. Weiterhin ist die Berücksichtigung von Grundwassereinfluss in bodennahen Bereichen notwendig, um einen für die Einbeziehung des Systems Boden im Klimamodell COSMO-CLM adäquaten und qualifizierten Parametersatz bereitzustellen.

Nach Angaben des Max-Planck-Instituts für Meteorologie in Hamburg werden folgende statische Bodenparameter für die Modellierung hydrologischer und energetischer Prozesse in der Klimamodellierung jeweils für regionsspezifische Böden benötigt:

- hydraulische Leitfähigkeit bei Sättigung (gesättigte Wasserleitfähigkeit kf)
- Matrixpotenzial bei Sättigung
- bodenhydraulische Parameter nach Clapp & Hornberger als Funktion der Texturklassifikation der amerikanischen Nomenklatur nach United States Department of Agriculture (USDA)
- volumetrische Porosität
- volumetrische Feldkapazität

- volumetrischer Welkepunkt
- Bodentiefe bis zum anstehenden Ausgangsgestein
- Wärmekapazität
- Wärmeleitfähigkeit
- Wurzeltiefe
- organisches Material (Soil organic content)
- Bodenfarbe/Albedo
- standardisierte Infiltrationsrate

Für die Evaluation der Modelle sind möglichst lange, flächenrepräsentative Zeitreihen von Bodenfeuchte, zur Bodentemperatur und Eiswassergehalt in verschiedenen Tiefen und zum Grundwasserflurabstand notwendig. Für bestimmte Messorte (mindestens eine repräsentative Station) sollten Bodenfeuchtemessungen mit Niederschlags und Temperaturmessungen und möglichst auch mit Messungen der aktuellen Verdunstung (Lysimeter) kombiniert werden. Alle Messungen sollten mit einer möglichst hohen zeitlichen Auflösung durchgeführt werden, idealerweise stündlich. Dies ist wichtig, um zu untersuchen, wie gut die Hydrologie in den Klimamodellen auf sub-täglicher Skala dargestellt wird. Soll das Verdunstungsverhalten untersucht werden, ist speziell für Oberböden eine hohe zeitliche Auflösung für Bodenfeuchtemessungen notwendig. Großräumig kann die Verdunstung mit hinreichender Genauigkeit über das Penman-Montheith-Modell (MONTEITH 1965) oder das Wendling-Turc-Verfahren (WENDLING et al. 1991) abgeleitet werden.

In naher Zukunft ist ein zunehmender Bedarf an Boden- und Vegetationsdaten für das neue Globale Modell für Wetter und Klima (ICON) des DWD und des Max-Planck-Institut für Meteorologie (MPI-M) zu erwarten. Zunehmend sind auch Daten zu Kohlenstoffkreislauf und Bodenbedeckung wichtige Eingangsgrößen für die Klimamodellierung.

Klimafolgen- und -anpassungsforschung

Die Klimafolgen- und -anpassungsforschung befasst sich mit den Auswirkungen von Klimaänderungen auf die Umweltkompartimente und die Landnutzung sowie mit der Notwendigkeit und der Wirkung von Maßnahmen zur Anpassung an Klimaänderungen.

Das Ausmaß des Klimawandels und die davon abhängenden Auswirkungen auf den Bodenzustand sind nur mit Simulationsrechnungen zu quantifizieren. So werden zur Abschätzung von Wirkungen veränderter Klimabedingungen beispielsweise Stoffumsatzmodelle (insbes. Kohlenstoff, organische Substanz), Wasserhaushaltsmodelle, Wachstums- / Ertragsmodelle oder Bodenerosionsmodelle eingesetzt (siehe Kasten).

Die bisherigen Ergebnisse von Simulationen weisen noch erhebliche Unsicherheiten z.B. im Hinblick auf die Veränderung der Niederschläge auf. Diese sind insbesondere durch die globalen und regionalen Klimamodelle und die zugrunde gelegten Szenarien zur Entwicklung der Treibhausgaskonzentrationen bedingt. Diese Unsicherheiten pausen sich bei den boden- und bodenwasserbezogenen Simulationsmodellen durch.

Für Simulationsrechnungen von Klimafolgen besteht der Bedarf an bodenkundlichen Informationen, die den Ausgangszustand des Systems beschreiben. Dazu gehören sowohl Flächen- und Punktdaten für zeitlich (quasi-) konstante Systemparameter (z.B. Profilaufbau, Bodenarten und deren physikalischen Eigenschaften, chemische Eigenschaften) als auch Daten für variable Parameter (z.B. Bodenfeuchte, Grundwasserstände) auf unterschiedlichen Skalen. Rasterbasierte Bodendaten können aus den in Bund und Ländern vorliegenden Bodenkarten in Verknüpfung mit Messdaten aus der Bodenzustandserhebung für das Bodenprofil in Tiefen bis 2 m unter Gelände abgeleitet werden.

Bodenparameter / Bodendaten in Modellen für die Klimafolgen- und -anpassungsforschung

Um die Wirkung und Folgen von Klimaänderungen auf die Böden zu simulieren, wird eine Vielzahl von Modellen eingesetzt, die für standort- oder gebietsbezogene Prozess-Simulationen entwickelt und validiert worden sind und Bodenparameter als Eingangsdaten benötigen:

- **Stoffumsatzmodelle**
  z.B. Stickstoffmodell HERMES; MONERIS Modelling Nutrient Emissions in River Systems
- **SOM/SOC-Modelle** (Humus/ Organischer Kohlenstoff)
  z.B. EPIC (inkl. CENTURY); ROTH-C; DNDC (forest: Pnet N DNDC); CANDY-Carbon Balance
- **Wasser- und Stoffhaushaltsmodelle**
  z.B. WASMOD Water and Substance Simulation Model; GROWA/WEKU Wasserhaushalt und Nährstoffabbau in der ungesättigten Zone und im Grundwasser
- **Wachstums-/Ertragsmodelle**
  z.B. Landwirtschaftliches Ertragsmodell GIS GRASS; Waldsukzessionsmodell 4C / FORESEE – FORESt; Waldsukzessionsmodell LPJ-GUESS (dynamisch)
- **Bodenerosionsmodelle**
  z.B. Hangmodell EROSION 2D; Einzugsgebietsmodell EROSION 3D; Allgemeine Bodenabtragsgleichung ABAG; Water Erosion Prediction Project WEPP; Wind erosion Equation WEQ

Die für eine Modellierung benötigten Daten hängen von der gewählten Fragestellung ab (siehe Tab. 3.3). Über die in Tabelle 3.3 genannten Parametergruppen hinaus sind Daten zum anthropogenen Eingriff in den Wasser- und Energiehaushalt, d.h. Landnutzung, Bewässerung und zu Erosionsprozessen wünschenswert.

Tab. 3.3: Bedarf an Bodendaten für Fragen der Klimafolgen- und -anpassungsforschung

Bodendaten / -parameter	**Fragestellung**
Angaben zur Verbreitung von Bodenarten	hydrologische und energetische Prozesse
Angaben zum Profilaufbau	
Angaben zu physikalischen Eigenschaften von Bodenarten (k_f, Lagerungsdichte, Schrumpfungs- / Quellungsverhalten etc.)	Wasserhaushalt (z.B. häufigeres Auftreten von Schrumpfung und Quellung von Böden unter zunehmender Trockenheit)
Angaben zu chemischen Eigenschaften (pH-Wert, Gehalt an organischer Substanz, Nährstoffgehalte)	Organische Substanz beeinflusst die Wasserhaltekapazität und die Stoffumsetzungen, hier gibt es Ansatzpunkte zur Emission von Klimagasen. Nährstoffgehalte beeinflussen Emission von Klimagasen (nutzungsabhängig)
Angaben zur Grundwassernähe (auf unterschiedlichen Skalen)	Grundwasserflurabstand beeinflusst Emission von Klimagasen

Die Bodendaten für Modellierungen von Klimafolgen können aus Karten, Datenbanken oder Modellierungen abgeleitet werden – je nachdem welche Modelltechnik (prozessbasiert, statistisch; großräumig oder standortbezogen) gewählt und wie die Unsicherheit berücksichtigt wird (siehe Tab. 3.4).

Tab. 3.4: Herkunft von Bodendaten für Wasser- und Stoffhaushaltsmodelle

Bodendaten	Statistische Modelle	Prozessbasierte Modelle
Bodentyp	Aus Karten abgeleitet	Aus Karten abgeleitet
Bodenart	Aus Karten abgeleitet	Aus Karten abgeleitet
Physikalische Bodeneigenschaften	In der Regel aus Bodentyp und -art abgeleitete Werte	Kennwerte aus Datenbanken abgeleitet
Chemische Bodeneigenschaften	In der Regel aus Bodentyp und –art und Nutzung abgeleitete Werte	Kennwerte aus Datenbanken abgeleitet
Profilaufbau	abgeleitet	Meist aus Musterprofilen abgeleitet
Grundwassernähe	Aus Karten abgeleitet	Meist modelliert (Wasserhaushalt)

Inwieweit klimabedingte Veränderungen des Bodenzustands in den Programmen des Bodenmonitoring und der Bodenzustandserhebung sowie in weiteren Programmen gemessen werden, wird in Kapitel 3.1.4 dargestellt (siehe z.B. Tab. 3.5), während die Programme auf Eingangsdaten für Modelle in Kapitel 3.2.4 geprüft werden (siehe z.B. Tab. 3.8). Ansprechpartner für Bodendaten für Fragen zu Klimawandel, Klimafolgen und Anpassung aus Messprogrammen und Bodenkarten sind in der Broschüre „Mess- und Erhebungsaktivitäten für Böden in Deutschland“ (AHU AG 2009, Entwurf) aufgeführt.

Fazit:

Sowohl in der Klimasystemforschung als auch in der Klimafolgen- und -anpassungsforschung besteht der Bedarf an Bodendaten. Neben regionalisierten und über die Tiefe differenzierten Daten zu Bodeneigenschaften und Daten zur Landnutzung und Vegetation sind auch Beobachtungsdaten zu Bodenfeuchte und -temperatur, Grundwasserflurabstand sowie zu chemischen Bodeneigenschaften erforderlich. Die beim Bund und in den Ländern vorliegenden flächenbezogenen Bodeninformationen bis 2 m Tiefe und geologischen Daten für Tiefen unterhalb von 2 m unter GOK stellen hierfür in Verknüpfung mit Messdaten zum Bodenzustand wichtige Datengrundlagen dar. Um das Anwendungspotenzial der Bodendaten zu verbessern, sollte der Informationsaustausch zwischen den datenerhebenden Behörden und Institutionen sowie den Datennutzern weiter vertieft und ausgebaut werden.

Der Datenbedarf ist je nach Fragestellung, eingesetztem Modell und betrachteten Raum- und Zeitskalen unterschiedlich und wurde hier anhand exemplarischer Modellansätze ermittelt. Es ist sinnvoll, den Datenbedarf jeweils modell- und fragestellungsbezogen zu konkretisieren. Bodendaten sind z.B. wichtige Bausteine für die von vielen Anwendern geforderte höhere Auflösung der Klimamodelle. Vom Max-Planck-Institut für Meteorologie in Hamburg liegt eine konkrete Liste der für die Modellierung hydrologischer und energetischer Prozesse benötigten statischen Bodenparameter vor. Diese stellt eine geeignete erste Grundlage für die Zusammenarbeit dar.

Langfristiges Interesse besteht aus Sicht der Klimamodellierer auch an Daten zu Kohlenstoffkreislauf und Bodenbedeckung. Hier gilt es, Strategien zu entwickeln, um die in Bund und Ländern vorliegenden Bodendaten und –karten und die benötigten Methoden zur Regionalisierung und/oder zum Up- und Downscaling besser bekannt und verfügbar zu machen. Einen Beitrag leistet hier die Zusammenstellung von Informationen in der Broschüre „Mess- und Erhebungsaktivitäten für Böden in Deutschland“ (AHU AG 2009).

3.1.3 Initiativen auf Bund-/Länder-Ebene

C. Kaufmann-Boll

Diverse Gremien auf Bund-/Länder-Ebene beschäftigen sich aktuell mit dem Thema Böden und Klimawandel und Klimafolgenmonitoring. Ergebnisse der nachfolgend genannten Aktivitäten wurden im Vorhaben als Informationsgrundlagen für die Bewertung von Bodendaten und die Ableitung von Handlungsempfehlungen berücksichtigt.

1. LABO-Auftrag „Boden-Dauerbeobachtung – Konkretisierung der prioritären, länderübergreifenden Fragestellung „Veränderung der Humusgehalte / Klimawandel“

Zur Konkretisierung der für das Bodenmonitoring prioritären, länderübergreifenden Fragestellung „Veränderung der Humusgehalte/Klimawandel“ wurde im Ständigen Ausschuss Vorsorgender Bodenschutz (BOVA) der LABO im Januar 2009 eine Redaktionsgruppe eingerichtet. Diese beschäftigt sich mit folgenden Aufgabenstellungen:

a) Darstellung/Konkretisierung der Kernfragestellungen der Thematik „Veränderung der Humusgehalte/Klimawandel“
b) konkrete Beschreibung der aus einer länderübergreifenden Boden-Dauerbeobachtung erforderlichen Beiträge und ggf. Darstellung von Methodenvorschlägen zur Beantwortung der Kernfragestellungen
b) Formulierung von länderübergreifenden Mindestanforderungen für ein Dauerbeobachtungsprogramm unter dem Aspekt “Veränderung der Humusgehalte/Klimawandel“ unter der Zielstellung einer Vorlage von Vorschlägen für die Optimierung der bereits bestehenden Boden-Dauerbeobachtungsprogramme der Länder unter Kosten-/Nutzengesichtspunkten.
c) Berücksichtigung weiterer Untersuchungsprogramme (u.a. Dauerfeldversuche, vTI-Projekt zur Erfassung der Kohlenstoffvorräte landwirtschaftlich genutzter Böden, Integrated Project CarboEurope-IP), im Hinblick auf die Nutzbarkeit der dort gewonnenen Daten und Integrations- bzw. Harmonisierungsmöglichkeiten in das Boden-Dauerbeobachtungsprogramm zur Fragestellung „Humusgehalte/Klimawandel“.

Der Ergebnisbericht wurde zur 37. Sitzung der LABO im Frühjahr 2010 vorgelegt.

2. LABO-Auftrag „Positionspapier Klimawandel – Betroffenheit und Handlungsempfehlungen des Bodenschutzes“

Ausgehend von den Anforderungen der Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel (DAS) richtete der Ständige Ausschuss Vorsorgender Bodenschutz (BOVA) der LABO im Juli 2009 eine weitere Redaktionsgruppe ein. Diese legte zur 38. Sitzung der LABO im Herbst 2010 ein Positionspapier vor,

a) das darlegt, welche Eigenschaften und Funktionen der Böden unter Berücksichtigung regionaler Betroffenheiten voraussichtlich am stärksten vom Klimawandel betroffen werden und
b) auf dieser Grundlage die Handlungserfordernisse zum Bodenschutz zusammenstellt

3. LABO-Umfrage „Boden und Klimawandel – Forschungsvorhaben der Länder“[4]

Die Umfrage wurde 2008 durchgeführt. Die darin zusammengestellten Forschungsvorhaben der Länder beziehen sich auf folgende Themen:

- Organische Substanz
- Entwicklung der Humusgehalte

[4] Quelle: Anlage 2 zu TOP 6.1 der 8. BOVA-Sitzung am 26./27.01.2009

- C-Quellen- und Senkenfunktion
- Erosion
- Verdichtung
- Wasserhaushalt
- Verschiedenes

4. Umfrage Bund-/Länder-Arbeitsgemeinschaft „Klima, Energie, Mobilität – Nachhaltigkeit“ 2008

Aus einer 2008 durchgeführten Umfrage der Bund-/Länder-Arbeitsgemeinschaft „Klima, Energie, Mobilität – Nachhaltigkeit“ bei den Bundesländern liegen mit Stand 2008 Informationen zum Einsatz regionaler Klimamodelle und Emissionsszenarien, zu Erfassungssystemen für klimainduzierte Wirkungen und Indikatoren für ein Klimafolgenmonitoring, zu Betroffenheitsstudien und Anpassungsstrategien vor.

Informationen über die genannten Aktivitäten sind im Internetangebot der LABO veröffentlicht (www.labo-deutschland.de) oder wurden vom Umweltbundesamt zur Verfügung gestellt.

3.1.4 Messgrößen für klimabedingte Veränderungen des Bodenzustands

ARGE BOKLIM

Um die Anwendbarkeit von Bodenmessdaten zu beurteilen, stellt sich zunächst die Frage, mit welchen Messgrößen (Parametern) klimabedingte Änderungen des Bodenzustands direkt belegt werden können und welche Messgrößen sich somit prinzipiell für eine Überwachung von Klimafolgen eignen. Tabelle 3.5 listet solche Parameter auf. Dazu ist jeweils angegeben, in welchen Programmen des Bodenmonitoring und der Bodenzustandserhebung sowie weiteren Messaktivitäten die Parameter erhoben werden.

Nicht alle genannten Parameter eignen sich dazu, im Rahmen von Monitoring- und Erhebungsprogrammen gemessen bzw. überwacht zu werden (vgl. Kap. 3.2 und 3.3). Neben den in Tabelle 3.5 genannten direkten Messgrößen sind zur Erklärung von ge-

messenen Veränderungen und Prozessen sowie zur Regionalisierung von Messergebissen weitere Angaben zu Boden-, Nutzungs-, Klima- und Witterungsbedingungen erforderlich.

Anhand der **Bodentemperatur und Bodenfeuchte** in unterschiedlichen Tiefen sowie der Sickerwasserrate können die direkten Wirkungen veränderter Klimabedingungen auf den Wärme- und Wasserhaushalt der Böden ermittelt werden. Außerdem sind indirekt Rückschlüsse auf die Freisetzung von Nähr- und Schadstoffen, die Freisetzung von Klimagasen und Veränderungen der Bodenlebensgemeinschaft sowie auf die Gefährdungen der Böden durch Bodenerosion und Verdichtung möglich.

Klimabedingte Veränderungen der **bodenmikrobiellen Aktivität** können durch die mikrobielle Biomasse und Enzymaktivitätsmessungen aus den jeweiligen Stoffkreisläufen (Kohlenstoff, Stickstoff, Phosphor, Schwefel) abgebildet werden. Sie sind als Indikatoren für Änderungen von Nutzungs- und Umwelteinflüssen besonders geeignet, da sie schneller als andere Bodenparameter, wie z.B. der Humusgehalt, auf Veränderungen reagieren. Um die **Struktur von bodenmikrobiellen Lebensgemeinschaften** und ihre potenziellen Änderungen adäquat zu erfassen, sind Messungen von Phospholipidfettsäuren als Biomarker für diverse Bodenorganismengruppen geeignet. Der Systemzustand der Bodenlebensgemeinschaft lässt sich anhand von **Indikatorgruppen** aufzeigen (z.B. tiefgrabende Regenwürmer). Weitere Schlüsselgruppen sind zu berücksichtigen (z.B. bodenbürtigen Pflanzenschädlinge/-krankheiten).

Eine Schlüsselrolle spielen Mineralisationsprozesse, über die die **Freisetzung von CO_2** (direkte kontinuierliche Messung von CO_2 aus mikrobieller oder wurzelbürtiger Atmung; über Modelle mittels labiler organischer Vorstufen und Informationen zum dynamischen Bodenzustand) und die Veränderung des **Humusgehalts** im Boden (bzw. die Speicherung von C) gesteuert wird. Klimasensitive Messgrößen sind weiterhin die **Freisetzung von N_2O und CH_4** (Messung von N_2O und CH_4 vergleichbar CO_2 s.o.); hierbei spielen die Verfügbarkeit organischer Ausgangsstoffe, pH-Wert und der Grad der Anaerobie (Redoxpotenzial) im Boden eine entscheidende Rolle.

Zu den bewirtschaftungsbedingten Gefährdungen der Böden, die durch den Klimawandel verstärkt werden, gehören einerseits **Bodenabträge** durch Wasser- und Winderosion, die sich direkt über die jeweilige Höhe des Abtrags und indirekt über klimatische

Faktoren, physikalische Bodeneigenschaften und Grad und Dauer der Bodenbedeckung ermitteln lassen. Weiterhin können Bodenverdichtungen über die Veränderung von **Trockenrohdichte** und den **k_f-Wert** (sowie Luftkapazität) ermittelt werden.

Tab. 3.5: Parameter zur Messung klimabedingter Änderungen des Bodenzustands

Im Boden ablaufender Prozess	**Ausmaß von potenziellen Klimaänderungen***	**Parameter zur direkten Messung klimabedingter Änderungen des Bodenzustands**	**In welchen Programmen wird der Parameter untersucht?****
Wärmehaushalt	hoch	Bodentemperatur in verschiedenen Horizonten (z.B. in °C)	DWD, Intensiv-BDF, ICP Level II, z.T. Feldlysimeter
Bodenerosion	hoch	Bodenabtrag (z.B. in t/ha * a) Profiltiefe (z.B. in dm)	wenige Intensiv-BDF (mit unterschiedlichen Ansätzen)
Sickerwasserfluss und Wasserspeicherung	hoch	Bodenwassergehalt / Bodenfeuchte in verschiedenen Horizonten (z.B. in Vol.-% oder mm)	Intensiv-BDF, ICP Level II, LWF, DWD, Feldlysimeter
		Sickerwasserrate, Grundwasserneubildungsrate (z.B. mm)	Intensiv-BDF, ICP Level II, Feldlysimeter, DWD
		Grundwasserflurabstand (z.B. in m u. GOK)	z.T. Basis-BDF, Intensiv-BDF, ICP Level II
Abbau und Anreicherung von organischer Substanz und Nährstoffen	hoch	Gehalte im Boden: C_{org}, C_{ges}, N, P, S (z.B. in mg/kg)	LWF, Basis-BDF, Intensiv-BDF, ICP Level I/BZE Wald, ICP Level II, z.T. BZE-L
		Mobile Fraktionen im Boden: C_{org}, C_{ges}, N, P, S (z.B. in mg/kg)	Basis-BDF, Intensiv-BDF, ICP Level I/BZE Wald
		Stoffgehalte im Sickerwasser: TOC, DOC, N, P, S (z.B. in mg/l)	Intensiv-BDF, ICP Level II, Feldlysimeter
Spurengashaushalt/-emissionen	hoch	Freisetzung und Verbrauch von CO_2 bzw. N_2O und CH_4; Parameter des Wärme- und Wasserhaushalts s.o.	Keine
		Fraktionierung von C_{org} (labile, d.h. leicht umsetzbare organische Bodenstoffe)	Keine
Bodenmikrobielle Veränderungen	nicht bekannt	Mikrobielle Biomasse (C_{mic}) (z.B. µg C/g) inklusive abgeleiteter Kennwerte (qCO_2, C_{mic}/C_{org} etc.)	Basis-BDF, Intensiv-BDF, LWF
		Bodenenzymaktivitäten aus den C-, N-, P- und S-Kreisläufen (jeweils ein Vertreter)	Basis-BDF, Intensiv-BDF
		Struktur von mikrobiellen Lebensgemeinschaften (z.B. Phospholipidfettsäuren / Phospholipid Fatty Acid (PLFA))	keine

Im Boden ablaufender Prozess	Ausmaß von potenziellen Klimaänderungen*	Parameter zur direkten Messung klimabedingter Änderungen des Bodenzustands	In welchen Programmen wird der Parameter untersucht?**
Veränderungen der Bodenfauna	nicht bekannt	Regenwürmer und mindestens eine Indikatorgruppe der Mesofauna, z.B. Enchyträen oder Collembolen (Artenspektrum, Abundanz, Dominanz und Frequenz der Arten, bei Regenwürmern auch Biomasse)	Basis-BDF, Intensiv-BDF, in Einzelfällen ICP Level I/ BZE Wald u. LWF
Abbau und Anreicherung von Schwermetallen und organischen Schadstoffen	nicht bekannt	Gehalte im Boden: Schwermetalle, org. Schadstoffe (z.B. mg/kg)	UPB, Basis-BDF, Intensiv-BDF, ICP Level I/BZE Wald, ICP Level II, z.T. LWF
		Mobile Fraktionen im Boden: Schwermetalle, org. Schadstoffe (z.B. mg/kg)	UPB, Basis-BDF, Intensiv-BDF, ICP Level I/BZE Wald, ICP Level II
		Gehalte im Sickerwasser: Schwermetalle, org. Schadstoffe, Nitrat (z.B. µg/l)	Intensiv-BDF, ICP Level II, selten LWF
Bodenverdichtung	nicht bekannt	Trockenrohdichte (z.B. in g/cm³), kf-Wert*** (z.B. in cm/d)	Basis-BDF, Intensiv-BDF, BZE, ICP Level I/BZE Wald, ICP Level II (meist einmalige Erhebung)

* Regionale Unterschiede sind möglich.
** BDF = Boden-Dauerbeobachtungsflächen, BZE = Bodenzustandserhebung, BZE-L = Bodenzustandserhebung Landwirtschaft, ICP Level I und II = ICP Forest, LWF = Landwirtschaftliche Feldversuche, UPB = Umweltprobenbank, DWD = Agrarmeteorologische Daten des Deutschen Wetterdienstes
*** gemessen oder aus bodenphysikalischen Eigenschaften abgeleitet

Fazit:

Parameter zur Messung klimabedingter Änderungen des Bodenzustands werden im Hinblick auf den Wärme- und Wasserhaushalt, Stoffhaushalt, die Bodenmikrobiologie und Bodenfauna und Bodenverdichtung in Programmen des Bodenmonitoring und der Bodenzustandserhebung und / oder weiteren bundesweiten Messaktivitäten untersucht, wobei jedoch nicht jeweils alle relevanten Messgrößen zur Verfügung stehen. Parameter zur Freisetzung von Spurengasen und zur direkten Messung von Bodenabträgen durch Erosion werden derzeit nur vereinzelt bzw. nicht im Rahmen der betrachteten Programme gemessen.

Um Wirkungen der erwarteten Klimaänderungen auf die Böden prognostizieren zu können, sind vertiefte Untersuchungen der zugrunde liegenden Prozesse unbedingt erforderlich. Für derartige Prozessbetrachtungen können Daten aus bodenbezogenen Messprogrammen eingesetzt werden. Programme, in denen Stoffflüsse gemessen werden (Intensiv-BDF, ICP Level II, Feldlysimeter), bieten Möglichkeiten zur Berechnung von standortbezogenen Stoffbilanzen und lassen Rückschlüsse auf An- oder Abreicherungen von Stoffen im Boden zu. Prozessorientierte Studien zum Wasserhaushalt werden insbesondere anhand der Intensiv-BDF und ICP Level II-Flächen, aber auch vertieft mittels Feldlysimetern durchgeführt.

3.1.5 Anforderungen an die Datenerhebung und effiziente Datennutzung

ARGE BOKLIM

Allgemeine Mindestanforderungen

Zum Einsatz von Bodendaten aus Monitoring- und Erhebungsprogrammen für Fragestellungen des Klimawandels und Klimafolgen bestehen zunächst allgemeine Minimalanforderungen hinsichtlich:

a) Messstandorten,

- Flächenrepräsentanz der Standorte bzgl. der räumlichen Verteilung der Bodenregionen und -landschaften, Landnutzungstypen und Bodenbedeckung; bzgl. Wasserhaushalt und Bodenerosion durch Wasser auch hinsichtlich hydrologischer Einheiten
- Bei rasterbezogenen Programmen eine hinreichende Messnetzdichte für die fragestellungsspezifisch angestrebte Maßstabsebene und Methoden zur Regionalisierung
- Lage von Standorten in allen relevanten Boden- und Klimaregionen unter ausgewählten Bewirtschaftungssystemen
- Räumliche Auflösung des Messnetzes in Anpassung an die Heterogenität der repräsentierten Böden / Mindestanzahl von Standorten

- Repräsentanz für Risikogebiete, die besonders von Klimaänderungen bzw. von deren Wirkungen auf die Böden betroffen sind

b) Untersuchungskonzept,

- Zeitliche Auflösung (Messperiodizität) in Anpassung an die zeitliche Dynamik der jeweilige Messgröße unter Berücksichtigung von methodischen Effekten, die nichts mit der zeitlichen Entwicklung der Messgrößen zu tun haben
- Einsatz genormter Verfahren nach aktuellem Stand der Technik[5] sowie Gleichwertigkeitsnachweise beim Einsatz anderer Verfahren für Probenahme, Probenvorbereitung und Analytik für Vergleichbarkeit und langfristige Messbeständigkeit
- Kontinuität von Parameterumfang und gleichwertigen Untersuchungsverfahren, um einen Mindeststichprobenumfang bei Zeitreihen zu erreichen
- Übertragbarkeit von Untersuchungsergebnissen auf Tiefenstufen von Böden und pedogenetische Bodenhorizonte
- Möglichkeit zur Untersuchung von Rückstellproben bei langfristigen Programmen und sachgerechte Probenlagerung (z.B. tiefgefrorene Proben)

c) Untersuchungsumfang (Parameterspektrum) mit Bezug zu Fragestellungen der Klimafolgenforschung und -anpassung sowie

- Untersuchung von Parametern, die potenziell von veränderten Klimaänderungen beeinflusst werden (klimasensitive Parameter) (siehe Kap. 3.1.4)
- Untersuchung von Parametern, die sich einer konkreten Fragestellung zu Klimafolgen und Anpassung zuordnen lassen (z.B. N2O-Freisetzung zur Ermittlung des Beitrags der Böden zu Emissionen von Stickstoff in die Atmosphäre)
- Untersuchung von Parametern, die als Indikatoren für die Wirkung auf zu beurteilenden Bodenfunktionen hinreichend aussagekräftig sind (z.B. Humusabbau, Nährstoffretention)

d) Dokumentation, Datenhaltung und Datenverfügbarkeit.

- Präzise Angaben zur räumlichen Lage von Messstandorten

---

[5] Handbuch der Bodenuntersuchung (BLUME et al. 2010), VDLUFA-Methodenbuch (1991, 1996), Handbuch Forstliche Analytik (BMELV 2007), LABO Bericht „Einrichtung und Betrieb von Boden-Dauerbeobachtungsflächen“ (BARTH et al. 2001)

- Einheitliche und aussagekräftige Datendokumentation (Metadaten) inkl. räumlicher Abdeckung, Parameter und Methoden, Anwendungsbereichen und Organisation
- Einheitliche und vollständige Methoden-Dokumentation von der Probenahme bis zur Analytik (z.B. Methoden-Code) sowie zu Messunsicherheit und analytischer Qualitätssicherung
- Dokumentiertes und übertragbares Datenformat
- Datenverfügbarkeit oder Anfragemöglichkeit für Einzelnutzer und Forschergruppen an zentraler Stelle
- Einheitlich geregelte Nutzungsbedingungen
- Kontinuierliche Aktualisierung und Information

Themenspezifische Anforderungen

Welche Mindestanforderungen an einen Parametersatz für Anwendungen in der Klimafolgen- und -anpassungsforschung für einzelne Bodenprozesse gelten, ist in Tabelle 3.6 zusammengestellt.

Tab. 3.6: Themenspezifische Mindestanforderungen für Bodenmonitoringaktivitäten zur Anwendung in der Klimafolgen- und -anpassungsforschung

Thema	**Mindestparameterumfang**	**Methodische Anforderungen (z.B. Probenahme, Analytik)**
Standortcharakterisierung als Basis für alle Themen	▪ Geographische Lage ▪ Klima ▪ bodenkundliche Ansprache (Bodenprofilbeschreibung, Bodentyp, Bodenform) ▪ Humusmorphologische Ansprache (Humusprofilbeschreibung, Humusform) ▪ bodenphysikalische Basisparameter: Korngröße, Gefüge, effektive Lagerungsdichte, Porengrößenverteilung, gesättigte hydraulische Leitfähigkeit (kf) ▪ bodenchemische Basisparameter: pH-Wert, C_{org} ▪ Grundwasserflurabstand ▪ Bodentemperatur ▪ Temperatur der bodennahen Luftschichten ▪ Relief ▪ Landnutzung	▪ Wiederholungen in mehrjährigem Abstand für bodenphysikalische Parameter und Humusform. Vorschlag: alle 10 Jahre und nach besonderen Ereignissen wie z.B. Grünlandumbruch ▪ mindestens monatliche Messung des Grundwasserflurabstands für grundwasserbeeinflusste Standorte mit Grundwasserflurabstand < 1 m ▪ Dokumentation des Grundwassermanagements für drainierte Acker- und Grünlandstandorte
Landnutzung und Bewirtschaftung	▪ Aktuelle und historische Landnutzungs- und Bewirtschaftungsgeschichte: o Fruchtfolge o Ertragsniveau und Entzüge o Bedeckungsgrad (zeitlich / räumlich) o Düngungsregime und -intensität o Stoffbilanzen	▪ fortlaufende Dokumentation der Nutzungs- und Bewirtschaftungsgeschichte inkl. Grünland, Forst und Sonderstandorte (Schlagkarteien, Aufnahmeblätter)
Nichtstofflicher Bodenzustand	<u>Erosion:</u> ▪ physikalische Basisparameter ▪ Ermittlung der natürlichen Erosionsdisposition durch Wasser und/oder Wind ▪ Kartierung aktueller Erosionsformen (Wind und/oder Wasser)	▪ Wiederholungen in mehrjährigem Abstand ▪ einmalig bei Einrichtung der Fläche ▪ ereignisabhängig
	<u>Verdichtung</u> ▪ physikalische Basisparameter	▪ Wiederholungen in mehrjährigem Abstand
	Ergänzend zur Erhebung der Einflussgrößen für Erosion und Verdichtung in bestehenden Zustandserhebungs- und Monitoringprogrammen ist eine direkte Überwachung des Erosionsgeschehens in der Landschaft bzw. im Einzugsgebiet erforderlich, wobei ein Bezug zu bestehenden Messstandorten hergestellt werden sollte.	

Thema	Mindestparameterumfang	Methodische Anforderungen (z.B. Probenahme, Analytik)
Bodenwasser-haushalt	▪ Bodenwassergehalt ▪ Wasserspannung ▪ Redoxpotenzial (in hydromorph geprägten Böden)	▪ horizontbezogene Messung ▪ langfristige und zeitlich hochauflösende Messung an bestehenden Standorten (z.B. Intensiv BDF) ▪ tägliche Messung an ausgewählten Standorten (wünschenswert sind darüber hinaus Mehrfachmessungen am Tag, wobei die Zeitabschnitte so gewählt werden sollten, dass Tagesmittel sinnvoll zu berechnen sind)
Stoffhaushalt, stoffliche Bodenbelastung	▪ Organische Bodensubstanz / Gelöste organische Substanz ▪ Fraktionierung von C_{org} ▪ Gehalte im Boden: Schwermetalle, organische Schadstoffe ▪ mobile Fraktionen im Boden: Schwermetalle, org. Schadstoffe ▪ Gehalte im Sickerwasser: Schwermetalle, organische Schadstoffe, Nitrat, pH-Wert	▪ Fraktionierung der organischen Substanz in Messfrequenzen < 5 Jahre
Boden-mikrobiologie	▪ Mikrobielle Biomasse (Cmic) inklusive abgeleiteter Kennwerte (qCO_2, C_{mic}/C_{org} etc.) ▪ Bodenenzymaktivitäten aus den C-, N-, P- und S-Kreisläufen (zumindest ein Vertreter) ▪ Bodenwassergehalt ▪ Organische Bodensubstanz / Gelöste organische Substanz ▪ (bioverfügbare) Nährstoff- Schadstoffkonzentrationen	▪ Beprobungs- und Messintervalle in einer Auflösung von kürzer als 1 Jahr, möglichst monatliche Auflösung
Bodenzoologie	▪ für mindestens eine Indikatorgruppe der Makrofauna (i.d.R. Regenwürmer) und der Mesofauna (z.B. Enchytraeiden, Collembolen): o Artenspektrum o Abundanz o Dominanz o Frequenz o Biomasse (nur Regenwürmer) ▪ vertikale Verteilung der untersuchten Mesofaunagruppe im Oberboden (Humusaktivitätsprofil)	▪ obligatorische Erhebung auf Artebene ▪ Zeitabstände für Wiederholungsuntersuchungen der Regenwürmer und Enchytraeiden ≤ 10 Jahre ▪ Zeitreihen stehen bei kürzeren Untersuchungsintervallen eher zur Verfügung; qualitative Veränderungen benötigen andererseits Zeit, d.h. zu kurze Intervalle (1-2 Jahre) sind ebenfalls nicht sinnvoll.

Thema	Mindestparameterumfang	Methodische Anforderungen (z.B. Probenahme, Analytik)
Klimarelevante Gase	▪ Freisetzung bzw. Bindung von CO_2, N_2O und CH_4 ▪ Bodentemperatur, Bodenwassergehalt, N-Eintrag ▪ Fraktionierung von C_{org} (insb. der leicht abbaubaren Fraktion) ▪ Nitrat- und Ammonium-Gehalt im Boden ▪ Mikrobielle Aktivität	▪ direkte und kontinuierliche Messung von Freisetzung und Bindung (stündlich) an ausgewählten Standorten, ggf. in Kombination mit Forschungsansätzen ▪ Fraktionierung der organischen Substanz in zeitlich hoch aufgelösten Messfrequenzen (Tage)

Spezielle Anforderungen der Klimamodellierung, Klimafolgen- und -anpassungsforschung

Von Seiten der Klimamodellierung sowie der Klimafolgen- und -anpassungsforschung bestehen spezielle Anforderungen[6]:

- Daten zu Bodeneigenschaften sollen mit **absoluter Messgenauigkeit und definierten** Messbedingungen vorliegen, damit die Unsicherheit bestimmt werden kann.
- Neben den Daten ist vor allem die **Beschreibung von Prozessen und Interaktionen** (System Boden – Vegetation – Atmosphäre) zu verbessern, die in Klimamodelle und Modelle für die Klimafolgenforschung eingehen. Dies gilt insbesondere in Bezug auf steigende CO_2-Gehalte, Pflanzenwachstum und Verdunstung. Bei den aus Mittelwerten abgeleiteten Verdunstungsverfahren wie z.B. nach HAUDE stellt sich die Frage, ob diese für zukünftige Klimaszenarien valide sind, wenn Extremereignisse häufiger werden und diese das Pflanzenwachstum prägen.
- Defizite bei der **Datengewinnung für die Parametrisierung von Bodenkenngrößen** wie sie im oben beschriebenen COSMO-CLM (siehe Kap. 3.1.2) durchgeführt wird, sind zu beheben. So können z.B. im geologischen Bereich die Informationen aus einer Lithofazieskarte Quartär (LFQ) z.T. nur mittels Interpolation gewonnen werden. Darüber hinaus werden die Angaben zur Mächtigkeit der einzelnen Schichten, wo keine Dokumentationspunkte sind, nur näherungsweise geschätzt. Des Weiteren ist festzustellen, dass die Zuverlässigkeit und Genauigkeit

[6] Die Ausführungen wurden mit freundlicher Unterstützung von Vertretern der BTU Cottbus, des Max-Planck-Instituts für Meteorologie (MPI-M) in Hamburg, des Landesamtes für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume (LLUR) Schleswig-Holstein, des Landesamtes für Geologie und Bergwesen Sachsen-Anhalt und des Johann Heinrich von Thünen-Instituts (vTI) in Braunschweig erarbeitet.

der Aussage mit der Tiefe sinkt. Diese Unsicherheit ist zurückzuführen auf die unsichere Zuordnung der Bodenarten zu den Substraten im Untergrund, da die Genauigkeit der LKQ-Einheiten beschränkt ist.

- Daten zu den **physikalischen Eigenschaften** der Böden sollten zum Teil besser verfügbar gemacht werden. Defizite bestehen bei der Trockenrohdichte und allgemein bei Torfarten.
- Flächendeckende und einheitliche Informationen zur **Verbreitung von Bodenarten** über **Ländergrenzen hinweg** sollten auch für mittlere Maßstäbe verfügbar sein. Derzeit stehen sie nur für kleine Maßstäbe zur Verfügung (z.B. Bodenübersichtskarten 1 : 200.000). Hier werden (auch für andere Zwecke) flächendeckende (länderübergreifende) mittelmaßstäbige Daten z.B. im Maßstab 1 : 25.000 bis 1 : 50.000 benötigt, die einheitlich auswertbar sind.
- Informationen über **chemische Eigenschaften** der Böden sollten aktuell und in Abhängigkeit der Landnutzungsentwicklung zur Verfügung stehen. Derzeit werden sie häufig mit Hilfe vergleichsweise alten Daten (> 20 Jahre) in Modellen berücksichtigt, die die aktuellen Verhältnisse ggf. nur bedingt widerspiegeln. Da die chemischen Bodeneigenschaften zum Teil von der Landnutzung abhängen, sind hier bei bestimmten Stoffen in den letzten Jahren Veränderungen aufgetreten (pH-Wert, Nährstoffgehalte, Humusgehalte).
- Änderungen des **Profilaufbaus ackerbaulich genutzter Böden** sollten in Bodenkarten berücksichtigt werden. Im Rahmen der konventionellen Landtechnik wird heute zum Teil in größerer Bodentiefe bearbeitet als früher, so dass die Oberböden meist mächtiger sind als in der Vergangenheit. Demgegenüber wird in Deutschland vermehrt die konservierende Bodenbearbeitung eingesetzt, die den Boden durch spezielle Techniken nahe oder an der Oberfläche bearbeitet. Diese Eigenschaften werden in den vorhandenen Übersichtsbodenkarten unzureichend berücksichtigt und könnten bei Karten größerer Maßstäbe oder in Modellbetrachtungen sinnvoll eingebracht werden.
- Häufig werden Bodentypen mit Hilfe von Pedotransferfunktionen ableitbare Bodeneigenschaften zugeordnet. Die Aussage über die **Güte einer Pedotransferfunktion** kann verbessert werden, wenn die Datensätze, die für Bodeneigenschaf-

ten je Bodenart benötigt werden, gesammelt und mit statistischen Verfahren ausgewertet werden.

- Die besonders bedeutsamen Parameter, die den Wasserhaushalt steuern, z.B. auch die **Grundwassernähe** eines Standorts, sollten aus Karten ableitbar sein. In den neuen Ländern kann sie Grundwassernähe z.B. aus mittelmaßstäbigen Karten (MMK) sehr gut abgeleitet werden, in den alten Ländern liegt sie nicht vor. Defizite bestehen hinsichtlich von Angaben zu Stauwassereinfluss und Zwischenabfluss.
- Von besonderer Bedeutung ist das Problem, dass die Messung von benötigten Bodeneigenschaften i.d.R. auf der Punktskala stattfindet und eine Übertragung von punkthaften Bodendaten auf größere Flächen erforderlich ist (**Upscaling**). Klimamodelle nutzen z.B. Rasterflächen zur Darstellung der Landoberfläche. Diese reichen von 1 x 1 km bis 50 x 50 km bei regionalen Klimamodellen bis hin zu 200 x 200 km bei globalen Klimamodellen. Das heißt Bodenparameter für Klimamodelle müssen für die Rasterauflösung nutzbar sein. Dazu ist entweder eine höhere subskalige Auflösung notwendig, z.B. 500 x 500 m, oder aber geeignete Informationen bezüglich der subskaligen Variabilität.
- Parametermessungen sind weiterhin häufig ortspezifisch. Sie sollten aber weitgehend auf andere Regionen übertragbar sein, die die gleiche Bodenart oder die gleiche Leitbodenform haben. Zur **Regionalisierung** sind somit standardisierte Werte notwendig.
- Für die Nutzbarkeit von Bodendaten in der Klimamodellevaluierung ist ein **einheitliches** Format unabdingbar. Daher wäre eine Abstimmung der datenhaltenden Institutionen mit potenziellen Nutzern im Vorfeld eines Projektes sehr sinnvoll.

<u>Fazit:</u>

Um das Anwendungspotenzial der Bodendaten in der Klimamodellierung, Klimafolgen- und -anpassungsforschung zu verbessern und weiter auszubauen, sollten die dargestellten Defizite zwischen den genannten datenerhebenden Behörden und Institutionen sowie den Datennutzern erörtert werden. Ziel muss es sein, nach gemeinsamen Lösungswegen zu suchen.

3.2 EIGNUNG VON DATEN AUS BODENMONITORING UND BODENZUSTANDSERHEBUNG - THEMENÜBERGREIFENDE BEWERTUNG

ARGE BOKLIM

3.2.1 Anwendungsbereiche von Bodendaten

Im Rahmen der dauerhaft angelegten bodenbezogenen Messprogramme wird eine Vielzahl wertvoller Daten für Fragen zu Klimafolgen und Klimaanpassung erhoben. Es hängt von der Fragestellung und den sich daraus ergebenden Anforderungen (vgl. Kap. 3.1.5) ab, wofür sich die vorliegenden Daten eignen.

Bodenschutz

Drei Anwendungsbereiche zur Beurteilung der Wirkungen von Klimaänderungen auf Böden und die Bodenfunktionen lassen sich unterscheiden:

1. **Langfristige Überwachung von Änderungen des Bodenzustands**
   Hierfür geeignet sind Daten aus langfristig angelegten Monitoring- bzw. Dauerbeobachtungsprogrammen an gleichbleibenden repräsentativen Standorten (ICP Level II, BDF, LWF, Umweltprobenbank, DWD) sowie mehrmalig durchgeführte Bodenzustandserhebungen (Wiederholungsinventuren) mit rasterbezogenem Messnetz (BZE Wald, BZE Landwirtschaft) jeweils mit festgelegter Methodik.

2. **Prozessstudien und vertiefende Messungen an repräsentativen Standorten**
   Hierfür geeignet sind Daten aus Programmen mit hochauflösenden, prozessorientierten Messungen an gleichbleibenden repräsentativen Standorten (Intensiv-BDF, ICP Level II, Feldlysimeter, Forschungsprojekte wie z.B. TERENO).

3. **Modellszenarien zu Veränderungen des Bodenzustands**
   Hierfür geeignet sind die in Bund und Ländern vorliegenden regionalisierten, d.h. flächenhaften Boden-, Relief- und/oder Landnutzungsdaten, die den Ist-Zustand des Bodens für unterschiedliche Maßstabsebenen beschreiben (z.B. bodenkundliche Karten, forstliche Standortkarten, Bodenschätzung, Digitale Geländemodelle, Landnutzungsdaten). Hier wird neben den bundesweit vorliegenden Übersichtskarten wie z.B. BÜK 1.000 auch auf mittel- und großmaßstäbige Kartengrundlagen der

Bundesländer verwiesen. Unter Anwendung von Regionalisierungsmethoden sind Daten aus Monitoring- und Erhebungsprogrammen geeignet, um bislang fehlende flächenhafte Informationen zu ermitteln.

Der Einsatz von Modellen zur Untersuchung von Veränderungen des Bodenzustands ist dann möglich, wenn die Ursache-Wirkungsbeziehungen von klimasensitiven Bodenprozessen bekannt ist, bzw. wenn bekannt ist, wie diese Prozesse durch Änderungen anderer Bodeneigenschaften gesteuert werden. Validierte Modelle und Verknüpfungsregeln[7] liegen für Bodenerosion, Stoff- und Wasserhaushalt, Ertragspotenzial und Versauerungsgefährdung vor. Prozessorientierte Messprogramme wie ICP Forest Level II, Intensiv-BDF und Dauerfeldversuche können hier einen Beitrag leisten, um Aussagen zur künftigen Entwicklung von Böden modellgestützt abzuleiten.

Klimasystemforschung, Klimafolgen und -anpassung

Kapitel 3.1.2 zeigt die Anwendungspotenziale der Bodendaten aus Sicht der Klimasystem-, Klimafolgen- und -anpassungsforschung auf. Eine Mehrfachnutzung von Daten aus Bodenmonitoring und Bodenzustandserhebung für verschiedene Zwecke führt zu einer deutlichen Wertsteigerung der Daten. Neben dem im BOKLIM-Vorhaben betrachteten Schwerpunkt der Ermittlung von Veränderungen des Bodenzustands unter dem Einfluss des Klimawandels werden Bodendaten für folgende weitere Anwendungsbereiche benötigt:

Positionsbestimmung und Erfolgskontrolle der Maßnahmen zur Klimaanpassung

Im Rahmen der Klimaanpassung kommt dem Boden als integrierendes Handlungsfeld weiterhin eine besondere Bedeutung für die Positionsbestimmung und Erfolgskontrolle der Maßnahmen zur Klimaanpassung zu. Für die erfolgreiche Unterstützung der Arbeiten am Aktionsplan Anpassung sind klare Vorstellungen über erstens Schlüsselprozesse und klimasensitive Bodenparameter und zweitens über Indikatoren für die Erfolgskontrolle von Maßnahmen notwendig. Ein Indikatorenkonzept für die Deutsche Anpassungsstrategie wird im Rahmen eines UBA-Forschungsvorhabens (2008 – 2010) erstellt. Die Ergebnisse des BOKLIM-Vorhabens können hier Hinweise liefern, inwiefern

---

[7] siehe z.B. Verknüpfungsregeln der Methodenbank des FISBo BGR: ww.bgr.bund.de/cln_101/nn_334064/DE/Themen/Boden/Informationsgrundlagen/methodenbank.html

Parameter für die Überwachung von Wirkungen des Klimawandels auf die Böden geeignet und inwieweit Messdaten für in Frage kommende Indikatoren aus Bodenmonitoring und Bodenzustandserhebung vorhanden sind.

Auf Bund-/Länderebene wird derzeit unter Koordination des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) daran gearbeitet, geeignete Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel für die Handlungsfelder der Deutsche Anpassungsstrategie zusammenzustellen. Diese gehen in den für 2011 vorgesehenen Aktionsplan Anpassung ein. Vor diesem Hintergrund sollte in einem ergänzenden Schritt geprüft werden, inwieweit sich die vorhandenen Programme des Bodenmonitoring und der Bodenzustandserhebung für eine Erfolgskontrolle von bodenbezogenen Anpassungsmaßnahmen eignen.

Planungsaspekte und umweltpolitisch aktuelle Themen

Die Programme des Bodenmonitoring und der Bodenzustandserhebung können weiterhin wertvolle Erkenntnisse für folgende Planungsaspekte liefern und von den jeweils beteiligten Ressorts angewendet werden:

- Flächennutzung: Klimabedingte Änderungen der Ertragsfunktion, Speicherkapazität von Böden für Treibhausgase, Kühlwirkung von Böden
  → Ressorts Landwirtschaft, Forstwirtschaft, Energie, Raumplanung
- Trinkwasserversorgung: klimabedingte Änderungen des Bodenwasserhaushalts
  → Ressort Umwelt / Wasserwirtschaft
  - Hochwasserschutz: klimabedingte Änderungen des Wasserrückhaltevermögens von Böden
    → Ressort Umwelt / Wasserwirtschaft
- Beregnung / Wasserbedarf und Wassernutzung in der Landschaft: klimabedingte Änderungen bzw. Etablierung von ressourcenschonenden Beregnungssystemen
  → Ressorts Wasserwirtschaft, Landwirtschaft
- Funktionalität von Landschaften / Landschaftsplanung (Bodenfunktionen): klimabedingte Änderungen der nachhaltigen Nutzbarkeit von und der Risiken in Landschaften
  → Ressorts Umwelt, Landwirtschaft / Forstwirtschaft

- Stoffflüsse / Stoffumsatz / Schadstoffbelastung von Böden: klimabedingte Änderungen von Nähr- und Schadstoffen und damit verbundene Risiken für die Bodennutzung sowie für Grundwasser und Oberflächengewässer
  → Ressorts Umwelt / Bodenschutz / Gewässerschutz, Landwirtschaft / Forstwirtschaft

Fazit:

Böden sind dynamische Naturkörper. Daten aus Bodenmonitoring und Bodenzustandserhebung ermöglichen belastbare Aussagen zu langfristigen Prozessen im Boden nicht nur für den allgemeinen Bodenschutz, sondern auch unter dem Blickwinkel des Klimawandels. Die Ergebnisse aus Bodenmonitoring und Bodenzustandserhebung stellen eine maßgebliche Entscheidungsgrundlage dar, wenn es um die Ableitung von Maßnahmen zur Klimaanpassung unter dem Blickwinkel des Bodenschutzes geht, denn sie liefern Eingangsdaten und Erkenntnisse für die Klimafolgenabschätzung. Darüber hinaus sind die Bodendaten eine wichtige Eingangsgröße bei der von vielen Anwendern geforderten höheren regionalen Auflösung der Klimamodelle.

Eine Mehrfachnutzung der Bodendaten für verschiedene Zwecke trägt darüber hinaus zu einer deutlichen Wertsteigerung der Daten bei. Neben dem im BOKLIM-Vorhaben betrachteten Schwerpunkt der Ermittlung von Veränderungen des Bodenzustands unter dem Einfluss des Klimawandels können die Daten der Bodenzustandserhebung und des Bodenmonitoring weiterhin einen wichtigen fachlichen Beitrag für Planungsfragen unterschiedlicher Ressorts und Fachbereiche (Umwelt, Land- / Forstwirtschaft, Bodenschutz, Wasserwirtschaft, Gewässerschutz, Energie, Raumplanung) leisten. Ferner sind sie wertvoll als fachliche Grundlagen für die Bearbeitung aktueller umweltpolitischer Themen wie Klimaanpassung, Reduzierung des Flächenverbrauchs, Nachhaltigkeitsstrategie und Biodiversitätsstrategie. Dies sind Themenfelder, die ausführlich in der Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel (DEUTSCHE BUNDESREGIERUNG 2008) beschrieben sind.

Vor diesem Hintergrund ist es erforderlich, dass Bund und Länder die notwendigen Anstrengungen unternehmen, die Programme des Bodenmonitorings und der Bodenzustandserhebung zu erhalten, entsprechend der Nutzerbedürfnisse anzupassen, bestehende Defizite bei der Datenerhebung zu beseitigen und die Programme unterein-

ander stärker zu vernetzen. Dabei sollten auch die für die landwirtschaftlichen Dauerfeldversuche verantwortlichen Stellen einbezogen werden, um diese besonders langfristig untersuchten und insbesondere für Fragestellungen der Humusversorgung und Ertragsfähigkeit gut geeigneten Standorte zu nutzen und zu erhalten.

3.2.2 Programmspezifische Dateneignung

Die Eignung der Messdaten der hier im Fokus stehenden forstlichen Monitoring- und Zustandserhebungsprogramme ICP Forest Level I / BZE Wald, ICP Forest Level II, der Boden-Dauerbeobachtung und der landwirtschaftlichen Dauerfeldversuche wird im Folgenden zusammenfassend erörtert.

Hierbei konnte eine aktuelle Arbeit der BOVA-REDAKTIONSGRUPPE „BDF/HUMUS/KLIMA“ (2010) zur länderübergreifenden Bearbeitung der Thematik „Veränderung der Humusgehalte / Klimawandel im Rahmen der Boden-Dauerbeobachtung“ einfließen, die eine vergleichende Darstellung verschiedener Messprogramme beinhaltet.

ICP Forest Level I / BZE Wald, ICP Forest Level II

Die Vorteile der forstlichen Programme liegen

1) in der hohen Standortzahl,
2) in der Vergleichbarkeit von föderal erhobenen Daten durch einheitliche Methoden zur Geländeaufnahme, Probenvorbehandlung, Analyse und Dokumentation und damit guten Eignung für stratifizierte (geschichtete) Auswertungen zur Identifizierung von Einflussfaktoren für Bodenveränderungen,
3) im effizienten Datenaustausch der beteiligten Institutionen untereinander aufgrund des gleichen Datenmanagements und einer Bundesdatenbank,
4) in der breiten Integration der Forschung durch Kopplung an weitere Inventuren unterschiedlicher Maßstabsebenen sowie
5) in der umfassenden Datenerhebung zum Messstandort in der BZE Wald.

Nachteile bestehen darin, dass

1) die Ergebnisse auf forstlich genutzte Böden beschränkt sind,
2) die künftige Fortführung nicht mit Sicherheit gegeben ist,

3) die Bewirtschaftungsdaten diskontinuierlich (nur zum Zeitpunkt der Inventur) erfasst werden und
4) derzeit noch Ergebnisse der BZE zum Waldwachstum fehlen.

Fazit:

Die Daten aus ICP Forest Level I / BZE Wald sind eine rasterbezogene Zufallsstichprobe. Sie sind aufgrund der hohen Anzahl von Messstandorten dazu geeignet, den aktuellen Zustand der Böden einschließlich der Faktoren Standort, Nutzung, Klima für Nährstoffgehalte und diffuse Schadstoffgehalte - in der BZE II auch organische Schadstoffe - repräsentativ abzubilden. Weiterhin können statistische Aussagen über Wechselbeziehungen zwischen Standort, Witterung/Klima, Bewirtschaftung und Belastungen abgeleitet werden.

Die Daten aus ICP Forest Level II sind aufgrund der Standorttreue bei dauerhaftem Betrieb dazu geeignet, langfristige Veränderungen der Böden und Aussagen zur künftigen Entwicklung der Böden für Bodenwasserhaushalt und Nährstoffein-/ austräge und -gehalte im Boden abzuleiten. Sie eignen sich aufgrund der zeitlich fortlaufenden Messungen besonders für eine vertiefende Untersuchung dynamischer Bodenprozesse (z.B. Ermittlung von Grundlagen für die Bodenwasserhaushaltmodellierung) sowie zur Weiterentwicklung und Validierung von Critical Load Ansätzen.

BZE Landwirtschaft

Die Inventur landwirtschaftlicher Böden hinsichtlich des Kohlenstoffstatus im Rahmen der BZE Landwirtschaft soll nach dem gleichen Messnetzkonzept wie die BZE Wald (rasterbasierte Stichprobe) und mit einheitlichen Methoden für Untersuchung und Datenerfassung durchgeführt werden. Somit treffen die diesbezüglichen Aussagen zur Dateneignung der ICP Forest Level I / BZE Wald auch auf die BZE Landwirtschaft zu. Nachteile bestehen darin,

1) dass sich der Untersuchungsumfang auf Fragestellungen zum Kohlenstoffstatus beschränkt,
2) dass flächendeckende Messergebnisse erst in mehr als 5 Jahren vorliegen werden und Zeitreihenauswertungen erst nach Durchführung der vorgesehenen Wiederholungsbeprobungen möglich werden sowie
3) dass keine Kopplung mit anderen Messprogrammen besteht.

Fazit:

Die Daten aus der rasterbezogenen Zufallsstichprobe der BZE Landwirtschaft werden aufgrund der hohen Anzahl von Messstandorten dazu geeignet sein, den aktuellen Zustand der Böden für Kohlenstoffgehalte einschließlich der Faktoren Standort, Nutzung und Klima repräsentativ abzubilden. Eine Vernetzung der BZE Landwirtschaft mit anderen Messprogrammen trägt nicht nur zur Validierung der Daten, sondern auch zur Steigerung der Effizienz bei der Datenerhebung und –nutzung bei.

Boden-Dauerbeobachtung

Die Vorteile der Boden-Dauerbeobachtung liegen

1) in der hohen Anzahl von Standorten in den meisten Bundesländern,
2) in der langfristig gesicherten Fortsetzung durch die gesetzliche Verankerung in Bodenschutzgesetzen der Länder,
3) in der Ausrichtung auf den vorsorgenden Schutz der Bodenfunktionen,
4) in der weitgehend systematischen Messflächenauswahl nach Kriterien der Standorts-, Nutzungs- und Belastungsrepräsentanz,
5) in der Untersuchung aller drei Hauptnutzungsarten Acker, Grünland und Wald mit einem einheitlichen Untersuchungskonzept je Bundesland und einem bundesweit empfohlenen Mindestparameterumfang,
6) in der zunehmenden Integration der BDF in ein umfassenderes Umweltmonitoring (Boden, Wasser, Luft, Vegetation), wobei neu einzurichtende Monitoringprogramme (z.B. Monitoring gentechnisch veränderter Organismen, Kohlenstoffmonitoring) die Beobachtungsflächen als Basis nutzen,
7) in der umfassenden Datenerhebung zum Messstandort, aller (Bodenschutz-) relevanten Bodeneigenschaften und Einflussfaktoren für Bodenveränderungen wie Witterung/Klima, Bewirtschaftung und Belastungen sowie der (einheitlich angestrebten) intensiven und lückenlosen Dokumentation der Bewirtschaftung,
8) im einheitlich empfohlenen und relativ engen Wiederholungszyklus und der damit gesicherten systematischen Fortsetzung zur Generierung von Zeitreihen (z.B. klimabedingt ggf. veränderte bodenbiologische Parameter),
9) in der praxisnahen Bewirtschaftung der Flächen durch die jeweiligen Besitzer unter Einbeziehung der realen politisch und sozioökonomisch bedingten Veränderungen,

10) in den Auswertungsmöglichkeiten zur kleinräumigen Variabilität aufgrund von getrennt beprobten Teilflächen oder Mehrfachbeprobung.

Nachteile der Boden-Dauerbeobachtung liegen

1) im weiterhin bestehenden Bedarf für eine länderübergreifende Harmonisierung von Konzept, Methoden und Daten- und Methodendokumentation mit konkreten Auswertungszielen und -methoden sowie
2) im Fehlen von verbindlichen, konkreten Vereinbarungen zu Methoden, Qualitätssicherung und Datenaustausch und fortlaufenden länderübergreifenden Abstimmungsprozessen. Hier liefern die derzeit laufenden Arbeiten des LABO-BOVA zur prioritären Frage von Humus und Klimawandel wichtige Erkenntnisse, die künftig für die Fragestellung der Stoffgehalte der Böden und deren zeitliche Veränderung fortgesetzt werden sollten.

Fazit:

Die Basis-Boden-Dauerbeobachtung ist innerhalb der meisten Länder je nach Standortrepräsentanz und Flächenzahl dazu geeignet, den aktuellen Zustand der Böden für Nährstoffgehalte, diffuse Schadstoffgehalte und Bodenbiologie einschließlich der Standortfaktoren Nutzung und Klima abzubilden und die Entwicklung des Bodenzustands anhand von Zeitreihen zu belegen. Die teilweise in den Ländern variierenden Konzepte zur Standortauswahl erfordern themenspezifische Repräsentanzprüfungen im Vorfeld von länderübergreifenden Auswertungen.

Die Intensiv-Boden-Dauerbeobachtung ist aufgrund des Langzeitcharakters und der Standorttreue dazu geeignet, langfristige Veränderungen der Böden für Schadstoff- und Nährstoffgehalte, Stoffflüsse sowie den Bodenwasserhaushalt unter veränderten Klimabedingungen abzuleiten und Prozesse anhand vertiefender Untersuchungen zu erklären. Die erhobenen Daten sind wichtig zur Kalibrierung und Validierung von Modellen der Klimasystemforschung sowie der Klimafolgenforschung und -anpassung.

Landwirtschaftliche Dauerfeldversuche

Die Vorteile der Dauerfeldversuche liegen

1) in der Untersuchung der Auswirkungen verschiedener Faktoren der Landbewirtschaftung auf Bodeneigenschaften (u. a. organische Substanz) unter kontrollierten Bedingungen und über lange Zeiträume,
2) in der Lieferung von Erkenntnissen zum Prozessverständnis für Modellierungen,
3) der intensiven und lückenlosen Dokumentation der Bewirtschaftung und
4) den guten Analysemöglichkeiten von Ursache-Wirkungsbeziehungen, da häufig nur einzelne Einflussfaktoren, z.B. Düngung, variiert werden.

Nachteile bestehen vor allem in Bezug auf

1) die geringe Anzahl von Untersuchungsstandorten und die dadurch geringe Flächenrepräsentanz der Standorte,
2) die häufig eingeschränkte Praxisnähe der Landbewirtschaftung, da nur eine begrenzte Anzahl von i.d.R. wissenschaftlich optimierten Varianten bzw. Faktoren untersucht werden,
3) die Begrenzung der Ergebnisse auf landwirtschaftliche Böden,
4) die nicht immer durchgeführte umfassende bodenkundliche Profilansprache,
5) die ungenügende Harmonisierung und damit Vergleichbarkeit der eingesetzten Methoden und
6) die fehlende Koordination und Standardisierung zwischen den einzelnen Versuchen.

Fazit:

Die landwirtschaftlichen Dauerfeldversuche sind dazu geeignet, am jeweiligen Standort – jedoch nicht in der Fläche – den aktuellen Zustand der Böden für stoffliche Belastungen, Nährstoffe (z.B. Einträge und Gehalte) und z.T. Bodenbiologie einschließlich der Standortfaktoren Nutzung und Klima abzubilden. Sie sind aufgrund des Langzeitcharakters und der Standorttreue dazu geeignet, langfristige Veränderungen der Böden und Aussagen zur künftigen Entwicklung der Böden für Nährstoffhaushalt und Ertragsgrößen sowie für Humusgehalte unter dem Einfluss des Klimawandels abzuleiten und sind wichtig zur Kalibrierung und Validierung von Modellen.

Fazit für weitere Messaktivitäten

Die agrarmeteorologischen Messdaten des Deutschen Wetterdienstes mit Bodentemperatur und Wasserhaushaltsgrößen stellen eine wichtig Ergänzung für Anwendungen der Klimasystem- sowie Klimafolgenforschung und -anpassung dar. Erkenntnisse und Messdaten der dauerhaft betriebenen Feldlysimeter sowie aus Forschungsprojekten wie z.B. TERENO, CarboEurope ergänzen die Monitoring- und Erhebungsprogramme, indem sie experimentelle Erkenntnisse und Methoden zur Modellierung von Bodenprozessen und zur Regionalisierung der punktuell gemessenen Daten liefern. Die Daten der Umweltprobenbank sind aufgrund der geringen Standortzahl als Ergänzung für Fragestellungen zur stofflichen Bodenbelastung anzusehen. All diese Messaktivitäten ersetzen jedoch nicht das Bodenmonitoring und die Bodenzustandserhebung mit ihren spezifischen Zielen und bodenschutz- oder bewirtschaftungsbezogenen Anwendungsbereichen.

Die Bodenschätzung ist aufgrund der hohen Anzahl von Messstandorten (Musterstücke, Vergleichsstücke, Grablöcher) insbesondere dazu geeignet, Standortfaktoren wie Bodenart, Humus, Gründigkeit, Steinbesatz, Staunässe, Geländegestaltung, Geologie usw. Klima repräsentativ und in großen Maßstab (1 : 5.000 und größer) zu beschreiben. Die Lage der Muster- und Vergleichsstücke wurde jedoch zum Zweck der Bewertung der Böden und nicht rasterbezogen oder belastungs- oder standortorientiert ausgewählt. Es findet eine reduzierte Datenerhebung im Wesentlichen unveränderlicher Bodeneigenschaften (z.B. Bodenart) statt. Die Bodenansprache erfolgt getrennt nach Ackerland und Grünland. Die in der Bodenschätzung verwendete Nomenklatur (z.B. Einteilung und Ansprache der Bodenarten) hat historische Wurzeln und bedarf ggf. einer Übertragung in aktuelle Systeme. Bewirtschaftungsdaten werden nicht erhoben. Der Anwendungsbereich für bodenbezogene Fragestellungen ist – gegenüber bodenkundlichen Standortkartierungen – teilweise eingeschränkt. Von Vorteil sind jedoch die Einheitlichkeit der Aufnahme, die Flächendeckung und der Bearbeitungsmaßstab (40 x 40 m-Raster).

3.2.3 Mögliche Aussagen und Nutzen von Bodenmonitoring und Bodenzustandserhebung für die Arbeiten der Bundesregierung am Aktionsplan Anpassung

Bei kontinuierlicher Fortführung und Anpassung der Programme an die in Abschnitt 3.1.5 genannten Anforderungen lassen sich mit den Daten aus Bodenmonitoring und -zustandserhebung darüber hinaus wichtige Fragen zu Klimawandel, Klimafolgen und Anpassung beantworten (siehe Tab. 3.7).

Tab. 3.7: Fragen zu Klimafolgen und -anpassung sowie Nutzen von deren Beantwortung (nach BOVA 2008, verändert und ergänzt)

Fragen zu Klimawandel, Klimafolgen und Anpassung	Nutzen für die Arbeiten der Bundesregierung am Aktionsplan Anpassung
Inwieweit werden sich die Humusgehalte der Böden durch den Klimawandel verändern? Können die Böden langfristig als Quellen oder Senken für Kohlenstoff betrachtet werden?	▪ Vermeidung negativer Auswirkungen auf die Bodenfruchtbarkeit, Wasserhaltefähigkeit und Erosionsempfindlichkeit ▪ Aufzeigen von Grenzen und Potenzialen der CO_2-Speicherung in Böden ▪ Ableitung von Handlungsempfehlungen für die Bewirtschaftung zur Anpassung an den Klimawandel
Inwieweit tragen die Böden zu Emissionen von Stickoxiden, Methan und Nitrat in die Atmosphäre bzw. Oberflächengewässer und Grundwasser bei?	▪ Einschränkung der Freisetzung von N_2O und CH_4 aus Böden / Erhöhung des Beitrags der Böden als N-Senke zur Reduzierung der Klimaerwärmung ▪ Frühwarnsystem/Vermeidung von Verschlechterungen des Zustands der Gewässer
Wie verändern sich Bodentemperatur und Bodenfeuchte?	▪ Ableitung von Handlungsempfehlungen für die Bewirtschaftung zur Anpassung an den Klimawandel ▪ Grundlage für Klimamodellierung und Verbesserung der Aussagekraft ▪ Grundlage für die Beurteilung des Einflusses auf den Stoffhaushalt und die bodenmikrobielle Aktivität
Wie verändert sich die mikrobielle Aktivität?	▪ Vermeidung von Beeinträchtigungen der Lebensraumfunktion der Böden ▪ Erkenntnisse über Veränderungen des Stoffumsatzes (z.B. Mineralisationsleistung) ▪ Indikator für Veränderung anderer Bodeneigenschaften

Fragen zu Klimawandel, Klimafolgen und Anpassung	Nutzen für die Arbeiten der Bundesregierung am Aktionsplan Anpassung
Wie werden sich Bodenverluste durch Bodenerosion und Bodenfunktionsbeeinträchtigungen durch Bodenverdichtungen entwickeln?	▪ Quantifizierung und Minimierung von Bodenverlusten ▪ Vermeidung von schädlichen Bodenveränderungen ▪ Ableitung von Maßnahmen zur Klimaanpassung aus Sicht der landwirtschaftlichen Bodennutzung
Wie verändern sich die Bodenlebensgemeinschaft und die Biodiversität in Böden durch den Klimawandel?	▪ Hinweise auf Veränderungen der Bodenlebensgemeinschaft und der Biodiversität im Boden ▪ Vermeidung von Beeinträchtigungen der Lebensraumfunktion oder Veränderung der Biodiversität der Böden ▪ Vermeidung von Beeinträchtigungen der Ökosystem-Dienstleistungen der Bodenlebensgemeinschaft ▪ Entwicklung von Strategien zur Kompensation unerwünschter Veränderungen der Bodenlebensgemeinschaft hinsichtlich ihrer Diversität und/oder Leistung ▪ Berücksichtigung der Leistungen der Bodenorganismen für Anpassungsstrategie an den Klimawandel

3.2.4 Eingangsdaten für Modelle

Klimamodelle mit globalem oder regionalem Bezug berechnen Bodentemperaturen und die Bodenfeuchte in verschiedenen Bodentiefen und benötigen diese Größen für repräsentative Böden zur Modellkalibrierung und -validierung (siehe Kap. 3.1.2). Für landwirtschaftlich genutzte Flächen stehen auf Anfrage fortlaufende Messreihen für etwa 500 naturräumlich repräsentative Standorte beim Deutschen Wetterdienst zur Verfügung, die mit klimatologischen Messgrößen gekoppelt sind. Es handelt sich um Tages- oder in jüngerer Zeit auch um Stundenwerte. Weiterhin liegen an Einzelstandorten der landwirtschaftlichen Dauerfeldversuche, Intensiv-BDF, ICP Level II-Standorten und z.T. für Feldlysimeter Daten zu Bodentemperaturen und Bodenfeuchte vor. Hier ist die Repräsentanz für Nutzungen, Klimaregionen und Bodenformen zu prüfen.

Je nach Wissensstand in den bodenkundlichen, biologischen und hydrologischen Forschungsdisziplinen werden **Modelle zur Prognose von Klimawirkungen auf den Bodenzustand** eingesetzt. Der Vorteil von Modellbetrachtungen ist, dass auch flä-

chenhafte Prognosen möglich sind (siehe Kap. 3.1.2). Voraussetzung ist, dass der im Boden ablaufende dynamische Prozess mit belastbaren Gleichungen beschrieben werden kann, die Modelle ausreichend validiert sind und flächenhafte Eingangsdaten zu den jeweils relevanten Bodeneigenschaften vorliegen. Dauerhaft eingerichtete, zeitlich hoch auflösende Monitoringprogramme liefern insbesondere Daten für die Modellkalibrierung und -validierung (vgl. Tab. 3.8). Darüber hinaus können sie grundsätzlich zur Interpretation von Modellergebnissen herangezogen werden.

Fazit:

Das agrarmeteorologische Messprogramm des DWD sowie ein Teil der Standorte von Bodenmonitoring und Langfristexperimenten liefern geeignete Bodendaten für die Kalibrierung und Validierung von Klimamodellen. Für Modellierungen von Klimafolgen eignen sich vorrangig Daten aus zeitlich hoch auflösendem Intensivmonitoring, wobei ergänzende forschungsorientierte Ansätze zur Modellentwicklung erforderlich sind. Die Dateneignung z.B. hinsichtlich der Flächenrepräsentanz und Untersuchungsverfahren muss je nach Fragestellung und eingesetztem Modell im Einzelfall geprüft werden.

Tab. 3.8: Parameter (-gruppen) zur Modellkalibrierung und –validierung

Modelltyp	**Parameter (-gruppen) zur Modellkalibrierung und -validierung**	**Geeignete Bodendaten aus Monitoring und Zustandserhebung***
Klimamodelle	Bodentemperatur Bodenfeuchte Kohlenstoffgehalt	DWD; z.T. LWF, Intensiv-BDF, ICP Level II-Standorte, Feldlysimeter
	Eiswassergehalt	keine
Bodenerosionsmodelle	Modellspezifische Eingangsdaten zu Infiltrationsrate und Rauhigkeit: Physikalische Basisparameter (vgl. Tab. 3.6)	LWF, Basis-BDF, Intensiv-BDF, ICP Level I / BZE, ICP Level II
	Flächendaten einschl. detaillierter Landnutzungsdaten	Bodenkarten, Bodenschätzung und andere Datenquellen
	Ergebnisse von C-Modellen	andere Datenquellen
Modelle für Bodenverdichtung	Modellspezifische Eingangsdaten zur Verdichtungsempfindlichkeit	LWF, Basis-BDF, Intensiv-BDF, ICP Level I / BZE, ICP Level II
	Flächendaten einschl. detaillierter Landnutzungsdaten	Bodenkarten, Bodenschätzung und andere Datenquellen

Modelltyp	Parameter (-gruppen) zur Modellkalibrierung und -validierung	Geeignete Bodendaten aus Monitoring und Zustandserhebung*
Bodenwasserhaushaltsmodelle	Bodenart, Bodentemperatur, Bodenfeuchte, Sickerwasser, Grundwasserflurabstand (kapillarer Aufstieg)	DWD, LWF, Intensiv-BDF, ICP Level II, Feldlysimeter, Level I / BZE II
	Lateraler Zufluss	keine
Modelle für den Stoffhaushalt und die stofflichen Bodenbelastung	Parameter für Stofftransport und veränderten Wasserfluss (Defizit zur Quantifizierung für bestimmte Formen des Stofftransports, z.B. preferential flow, partikelgebundener Transport)	Intensiv-BDF, ICP-Level II
	Schadstoffsorption: substratübergreifende Adsorptionsisothermen, K_{OC}-Werte (Defizit zu klimabedingten Wirkungen auf den partikelgebundenen Transport, z.B. von DOC, bzw. Ausmaß von preferentiellen Fließphänomenen)	ICP Level I/ BZE Wald, Level II und Zeitreihen Basis-BDF (Verifizierung)
	Lösung/Fällung/Immobilisierung von Stoffen in Regionen mit einer zeitweise negativen Wasserbilanz: Wasserhaushalt in Kombination mit physikochemischer Gleichgewichtsmodellierung	ggf. Intensiv-BDF
	Schadstoffabbau im Boden: 1) Arrhenius-Funktion (Kinetik), Bodentemperatur; 2) Mikrobielle Aktivität	DWD, Feldlysimeter, Intensiv-BDF
	Mineralisation/Umsetzung der organischen Bodensubstanz/C- und N-Freisetzung: Bodentemperatur, Wassergehalt	ICP Level/ BZE Wald
Modelle für die Bodenmikrobiologie	Es sind noch keine validierten Modelle verfügbar.	potenziell Basis-BDF, Intensiv-BDF
Modelle für die Bodenfauna	Es sind noch keine validierten Modelle verfügbar, jedoch Modelle für die Verknüpfung von Bodeneigenschaften und Lebensgemeinschaftstypen, die eine flächenhafte Darstellung von zu erwartenden Ausprägungen der Bodenlebensgemeinschaft erlauben.	Grundlage für diese Modelle sind die Erhebungen auf BDF.
Modelle für Klimarelevante Gase	Freisetzung CO_2, N_2O, CH_4: physikalische und chemische Bodeneigenschaften Defizite: Landnutzungsdaten, Fraktionierung von C_{org}	Level II und BDF, sensitiv nur Angaben Level II
Landnutzungsmodelle	Fruchtfolgesysteme, Düngungsintensität, Bodenbearbeitung	LWF, z.T. BDF, Interdisziplinäre Langzeituntersuchungen (z.B. TERENO, DFG-Exploratorien)

* Eignung aufgrund der Untersuchungskonzeption und Messhäufigkeit

3.2.5 Räumliche Aussagen zu Bodenzustand und klimabedingten Veränderungen

ARGE BOKLIM

Flächendeckende räumliche Aussagen zum Bodenzustand liegen in Deutschland auf Bundesebene mit der nutzungsdifferenzierten Bodenübersichtskarte der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) im Maßstab 1 : 1.000.000 vor (RICHTER et al. 2007) (Gründigkeit, typische Bodenart, Wasserverhältnisse, Ausgangsgestein (Substrat), vorherrschendes Relief, nutzungsspezifisches Bodeninventar der Acker-, Grünland- und Waldflächen). Im gleichen Maßstab stehen bundesweite Karten der Bodenarten, der organischen Substanz und der Sickerwasserrate aus dem Boden zur Verfügung. Weiterhin liegt für weite Teile Deutschlands mit der Bodenübersichtskarte 1 : 200.000 der BGR eine einheitliche bundesweite Bodenkartierung vor. Räumlich detailliertere Informationen zum Bodenzustand in Maßstäben von 1 : 100.000 bis 1 : 25.000 werden in den Bundesländern i.d.R. durch die Geologischen Dienste oder Landesämter bereitgestellt. Für lokale Anwendungen sind darüber hinaus großmaßstäbige Bodenkarten und Bodenschätzungskarten (Maßstab ≈ 1 : 5.000) sowie Kartenwerke der Forstlichen Standortskartierung vorhanden.

Von der BGR und den Staatlichen Geologischen Diensten in der Bundesrepublik Deutschland (SGD) werden Auswertungsmethoden zur Beurteilung der Empfindlichkeit und Belastbarkeit von Böden erarbeitet (AD-HOC-AG BODEN 2000) und fortgeschrieben. So genannte Pedotransferfunktionen erlauben die Ableitung von aufwändig messbaren Bodenparametern aus einfacher messbaren Bodenparametern (z.B. Feldkapazität aus Korngrößenzusammensetzung, Humusgehalt und Bodendichte). Es stehen zudem Methoden für eine flächenhafte Ermittlung von Erosions- und Verdichtungsgefährdungen bzw. -empfindlichkeiten zur Verfügung (vgl. z.B. HENNINGS 2003).

In zwei vom Umweltbundesamt geförderten Forschungsvorhaben wurde bundesweit den Fragen nach der Verdichtungsempfindlichkeit landwirtschaftlich genutzter Böden (FKZ 3707 71 202) sowie zu Auswirkungen des Klimawandels auf die Bodenerosion durch Wasser (FKZ 3708 71 205 02) nachgegangen (Abschluss 2010). Im Rahmen dieser Forschungsvorhaben wurden auch flächenhafte Bewertungen in Form von bundesweiten Übersichtskarten vorgenommen.

Fazit:

Räumliche Informationen zu möglichen Wirkungen von Klimaänderungen auf die Böden liegen derzeit nur für bestimmte Bodengefährdungen vor. So können in Abhängigkeit von den eingesetzten Modellen Aussagen über die Erosionsrisiken von Einzelhängen und Einzugsgebieten bis auf Bundesebene getroffen werden. Voraussetzung dafür sind belastbare, räumlich hoch aufgelöste Klimadaten. Als Beispiel für aktuell vorliegende Karten zur Empfindlichkeit von Böden gegenüber Klimaänderungen ist die o.g. Abschätzung der Bodenerosion durch Wasser im Rahmen des UBA-F+E-Vorhabens FKZ 3708 71 205 02 zu nennen.

Es fehlen bisher bundesweite räumliche Abschätzungen möglicher Wirkungen von Klimaänderungen auf den Abbau organischer Substanz, den Bodenwasserhaushalt, die biologische Aktivität, die Zusammensetzung der Bodenlebensgemeinschaft, die Freisetzung klimarelevanter Gase und die Schadstoffmobilität. Mit Verweis auf die regional sehr unterschiedlich zu erwartenden Klimaänderungen (vgl. Kap. 1) sind derartige Einschätzungen jedoch vor allem auf regionaler Ebene (z.B. der Bundesländer) gefordert. So liegen in vielen Bundesländern bereits Berichte und flächenhafte Aussagen zu möglichen klimabedingten Veränderungen von Böden oder bodenbezogenen Prozessen vor, z.B. zu Erosion und Wasserhaushalt (z.B. Beregnungsbedarf). Beispielhaft sei auf Broschüren, Hefte und Berichte aus Thüringen (TMLNU 2009), Niedersachsen (LBEG 2009), Sachsen (SMUL 2009), Nordrhein-Westfalen (MUNLV 2009), Brandenburg (MLUV 2008) und Sachsen-Anhalt (MLU 2009) verwiesen. Im Folgenden ist zudem eine Auswahl von Projekten aufgeführt, die derzeit in der Planung oder Durchführung sind:

- Auswirkungen des Klimawandels auf die Ertragsentwicklung in Sachsen (LfULG 2009)
- Abschätzung der Klimafolgen auf den Wasserhaushalt der Böden Sachsens (LfULG 2009)
- Bodenabtrag durch Wassererosion in Folge von Klimaveränderungen: Bodenschutz im Klimawandel – KLIWA – Forschungsvorhaben Baden-Württemberg (Groh 2009)
- Bodenbearbeitung und Humushaushalt von Ackerflächen im Hinblick auf den Klimawandel in Sachsen (Nitsche 2009)

Methoden zur Ermittlung flächenhafter Aussagen

Messdaten von rasterbasierten Messnetzen oder von für einen definierten Raum repräsentativen Standorten können zur Ermittlung flächenhafter Informationen genutzt werden, indem Regionalisierungsmethoden angewendet werden. Methodische Grundlagen für eine Regionalisierung von Bodendaten stehen mit statistischen und geostatistischen Verfahren zur Verfügung, die im stofflichen Bereich für Böden erprobt sind.

Zur Ermittlung von flächenhaften Informationen bieten sich vor allem die rasterbasierten Erhebungsprogramme der Bodenzustandserhebung (BZE) an. Mit ihrem vergleichsweise engen Messnetz werden Bodeneigenschaften untersucht, mit denen punktuell an repräsentativen Standorten gemessene Daten (z.B. zur Bodenfauna) verknüpft und so in die Fläche übertragen werden können. Auch ist eine Verknüpfung von Messergebnissen mit Bodenkarten in unterschiedlichen Maßstäben (z.B. Bodenübersichtskarte der Bundesrepublik Deutschland 1 : 200.000) möglich.

Auf diese Weise kann der Ausgangszustand der Böden für flächenhafte Wirkungsanalysen abgebildet werden. Langfristig sind die Daten aus diesen Programmen bzw. Karten jedoch nur verwendbar, wenn die Daten in regelmäßigen Abständen aktualisiert werden.

Erfüllen Messstandorte von nicht-rasterbasierten Programmen bestimmte Anforderungen an die Flächen- bzw. Landschaftsrepräsentanz (z.B. Repräsentanz für definierte Raumeinheiten aus Bodenform, Klimaregion und naturräumlicher Einheit), kommen auch deren Messergebnisse zur Ermittlung räumlicher Aussagen in Frage. Aussagen zur Repräsentanz und zur Mindestanzahl von Messstandorten lassen sich nur länderübergreifend bzw. bezogen auf naturräumliche Einheiten machen. Bundesweite und Messnetz übergreifende Repräsentanzanalysen für die ICP-Level II-Standorte und landwirtschaftlichen Dauerfeldversuche stehen noch aus. Methodische Ansätze zur Prüfung von Messnetzen anhand der Kriterien Messdatenvergleichbarkeit, Landschaftsrepräsentanz von Messtandorten und geostatistische Repräsentanz von Messdaten wurden anhand der Boden-Dauerbeobachtung entwickelt (vgl. SCHRÖDER et al. 2003).

Bereits eingesetzt wurden Methoden zur Ermittlung räumlicher Aussagen aus Messdaten der Monitoring- und Erhebungssysteme für Gehalte und Vorräte von organischer Substanz und Spurenelemente im Boden.

Für die flächenhafte Modellierung der Bodenerosion unter den Bedingungen des Landnutzungswandels ist es nötig, die Veränderungen der einzelnen Eingabeparameter zu quantifizieren (Veränderung der Phänologie / Einsaat / Ernte, C_{org}-Gehalte im Boden, Bodenbedeckung, Wassergehalte etc.). Dafür ist eine enge Vernetzung der bodenbezogenen Monitoring- und Erhebungssysteme mit laufenden Klimafolgenforschungsprojekten nötig.

Die Übertragung von standortbezogenen Messergebnissen zur Bodenfauna in die Fläche kann durch Verknüpfung von bodenzoologischen Daten mit flächenhaft verfügbaren Bodeneigenschaften (Humusform, Bodenart, pH-Wert, Grundwasser) und der Nutzung erfolgen. Auf dieser Basis lassen sich Vorhersagen zum Vorkommen ökologischer Gruppen der Regenwürmer und zum Vorkommen bestimmter Typen der Bodenlebensgemeinschaft treffen. Begrenzend für den räumlichen Detaillierungsgrad wirkt die räumliche Auflösung, mit der die Daten für die Bodeneigenschaften vorliegen. Die dafür notwenigen Verknüpfungsregeln sind derzeit jedoch Expertenwissen, welches nicht in einem bundesweit validierten und abgestimmten Regelwerk vorliegt. Auch zur Übertragung bodenmikrobieller Aussagen in die Fläche sind über die Verknüpfung von Messdaten mit flächenhaft dokumentierten Bodeneigenschaften nachvollziehbare Methoden zu entwickeln.

Keine validierten räumlichen Aussagen können bisher zur Freisetzung von Spurengasen (CO_2, N_2O, CH_4) getroffen werden, da bislang repräsentative Messdaten, Modelle für verschiedene Nutzungstypen und erprobte Regionalisierungsmethoden fehlen.

3.2.6 Defizite der Programme des Bodenmonitorings und der Bodenzustandserhebung

ARGE BOKLIM

Zur Anwendung von Bodendaten für Fragestellungen des Klimawandels bestehen hohe Anforderungen an Format, Dokumentation, Auflösung, Skala, Repräsentanz und Varianz (vgl. Kap. 3.1.5). Diese Anforderungen werden in den meisten Programmen des Bodenmonitoring und der Bodenzustandserhebung nicht vollständig erfüllt. Anhand von Metadaten, d.h. der Beschreibung vorliegender Daten aus Monitoring und Erhebung, des Datenbedarfs und der Dateneignung, wurden folgende Defizite abgeleitet:

1. Eingeschränkte Eignung des Untersuchungskonzepts und organisatorische Defizite

- Die eingesetzten Probenahme-, Vorbereitungs- und Analyseverfahren und die Maßnahmen zur Qualitätssicherung variieren zwischen Programmen, z.T. aber auch innerhalb eines Messprogramms im Laufe des Untersuchungsbetriebs. Probennehmer und Labore werden gewechselt und ausgegliedert. Dies schränkt die Vergleichbarkeit der Messdaten und damit ihr Anwendungspotenzial für zeitliche Auswertungen z.T. sehr deutlich ein. Häufig fehlen Informationen zur Beurteilung der Vergleichbarkeit und Möglichkeiten zur Umrechnung von Messwerten verschiedener Untersuchungsverfahren.
- Die Untersuchungshäufigkeiten der BZE und Boden-Dauerbeobachtung reichen für bestimmte Fragestellungen nicht aus (Untersuchungen organische Substanz, Lagerungsdichte und Mikrobiologie auf BDF).
- Die Übertragung von punktuellen Messergebnissen in flächenhafte Informationen (Regionalisierung) wird zum Zweck der Eingabe in globale und regionale Klimamodelle (hier Rasterformat) sowie zur Beschreibung des Ausgangszustands von Böden für modellgestützte Prognosen von Klimawirkungen (hier reale Flächen) benötigt. Regionalisierungsmethoden stehen zur Verfügung (vgl. Kap. 3.2.5). Es fehlen jedoch bislang Erfahrungen mit Daten aus den bundesweiten Monitoring- und Erhebungsprogrammen.

- Werden Erhebungen und Monitoringaktivitäten im Rahmen von Forschungsprojekten durchgeführt, ist eine langfristige Fortführung nicht gesichert. Auch wenn diese Projekte das Wissen ergänzen, werden sie wegen ihrer begrenzten Laufzeit nicht in der Lage sein, durch den Klimawandel ausgelöste, schleichende Veränderungen von Bodenzustand und Beeinträchtigungen der Bodenfunktionen nachzuweisen.
- Prozessorientierte Forschungsprojekte (z.B. TERENO, CarboEurope) wurden und werden in der Regel ohne systematische Anbindung an bestehende Monitoringnetze und ohne Absprache mit den Verantwortlichen von Bund und Land angelegt; damit fehlt die Möglichkeit, Regionalisierungsansätze und damit eine Übertragbarkeit in die Fläche zu realisieren.

2. Eingeschränkt geeignete Dokumentation, Datenhaltung und Verfügbarkeit

- Mit Ausnahme der Umweltprobenbank finden die Datenhaltung und das Datenmanagement in einer Vielzahl von Stellen in Bund und Ländern und Forschungsinstituten mit unterschiedlicher Technik statt. Für die Bodenzustandserhebungen und z.T. für Basis-BDF[8] werden Daten der Bundesländer auf Bundesebene zusammengeführt. Dies führt zu einem hohen Aufwand bei der Beschaffung von Daten und der Zusammenführung aus verschiedenen Programmen.
- Bislang werden Bodendaten nur begrenzt von Klimaforschungseinrichtungen für Modellierung von Klimaänderungen eingesetzt. Hindernis ist hier u. a. die fehlende Kenntnis über die vorhandenen Daten und deren Verfügbarkeit.
- Die Nutzungsrechte von Daten sind derzeit nicht einheitlich geregelt. Dies schränkt die Anwendung auf Seiten der Klimafolgenforschung und -anpassung ein.

---

[8] Eine zentrale Datenbank für Basis-BDF ist im Aufbau und beinhaltet derzeit z.B. noch keine bodenzoologischen Daten.

3. Einschränkungen hinsichtlich der Eignung von Messstandorten

- Übergreifend für die betrachteten Messprogramme ist derzeit nicht vollständig bekannt, für welche Raumeinheiten bzw. Konstellationen von Einflussfaktoren die Messstandorte repräsentativ sind. Insbesondere die Informationen über die Bewirtschaftung liegen nur teilweise vor bzw. lassen sich nur teilweise den Bodenzustandsinformationen zuordnen.
- Innerhalb der Boden-Dauerbeobachtung und der landwirtschaftlichen Dauerfeldversuche ist aufgrund der variierenden Untersuchungskonzepte und unterschiedlichen Ziele davon auszugehen, dass die Repräsentanz der einzelnen Messstandorte unterschiedlich ist.

4. Eingeschränkte Kompatibilität von Daten aus unterschiedlichen Messprogrammen

- Die Bodenuntersuchungen erfolgen in den rasterbezogenen Erhebungsprogrammen der Bodenzustandserhebung (BZE Wald und Landwirtschaft) und des DWD in definierten und einheitlichen Tiefenstufen, während die Untersuchungen auf Boden-Dauerbeobachtungsflächen für die standorttypischen pedogenetischen Horizonte durchgeführt werden. Eine direkte Vergleichbarkeit ist meist nicht gegeben.
- Die eingesetzten Probenahme-, Vorbereitungs- und Analyseverfahren variieren zwischen den Monitoring- und Erhebungsprogrammen und schränken die Vergleichbarkeit der Messdaten und damit ihr Anwendungspotenzial für überregionale Aussagen deutlich ein. Es fehlen verbindliche Vereinbarungen zum Einsatz vergleichbarer Verfahren für BDF, LWF und Feldlysimeter.
- Die Repräsentanz von Standorten der vorhandenen Messnetze ist – je nach Ziel und Fragestellung des Messnetzes – unterschiedlich.

5. „Systembedingte“ Unsicherheiten

- Veränderungen des Bodenzustands lassen sich zum Teil nur sehr langfristig belegen. Belastbare Ergebnisse zu zeitlichen Trends in Bezug auf den Bodenzustand können z.B. erst nach ca. 30 bis 50 Jahren bei einer hinreichenden Untersuchungshäufigkeit vorgelegt werden. Entsprechend lange Messreihen sind bislang nur aus den landwirtschaftlichen Dauerfeldversuchen, aus der Boden-Dauerbeobachtung einzelner Bundesländer sowie einzelner Feldlysimeter verfüg-

bar, d.h. die Zeiträume der Überwachung von Veränderungen des Bodenzustands sind bislang für bestimmte Fragestellungen zu kurz, um belastbare Aussagen über Veränderungen zu treffen.

- Die Aussagegenauigkeit der erhobenen Bodendaten kann auch bei homogenen Datenbeständen und einheitlichen Beprobungsmethoden mit Unsicherheiten behaftet sein, so dass bislang auch hier das Hintergrundrauschen i.d.R. nicht quantifiziert werden konnte.

Themenbezogene Defizite sind in Tabelle 3.9 zusammengefasst.

Tab. 3.9: Defizite für die Anwendung von Bodendaten aus Monitoring und Zustandserhebungen für themenspezifische Fragen von Klimafolgen und Klimaanpassung

Thema	Defizite
Nichtstofflicher Bodenzustand	▪ Untersuchungsparameter, ausschließlich plotweise Anlage der Monitoringflächen und das häufige Fehlen von Bodenbedeckungs- und Bewirtschaftungsinformationen erlauben keine Übertragbarkeit auf die Fläche (Erosion, Verdichtung).
Bodenwasserhaushalt	▪ Die messtechnische Ausrüstung an Intensiv-BDF variiert in Abhängigkeit von der Einrichtung sowie der Fragestellung (z.B. im Rahmen von Projekten) oder auch zwischen den einzelnen Bundesländern. Eine Vergleichbarkeit ist nur zum Teil gegeben.
Stoffhaushalt, stoffliche Bodenbelastung	▪ Sensibel reagierende Parameter werden häufig nicht gemessen (z.B. Kohlenstofffraktionen, mobile Metallgehalte). ▪ Die für unterschiedliche Stoffe bedeutsamen saisonalen Einflüsse (C, N) können aufgrund zu geringer Messintervalle oft nicht erfasst werden. ▪ Die Ausgasung spielt für einige Schadstoffe (z.B. As, Hg, verschiedene organische Schadstoffe) eine wichtige Rolle. Die Ausgasung wird derzeit in keinem der bundesweiten Monitoring- und Erhebungsprogramme berücksichtigt. ▪ Die insbesondere für den Nährstoffhaushalt wichtigen Bewirtschaftungsdaten stehen häufig nicht oder nicht in geeigneter Form zur Verfügung.
Bodenmikrobiologie	▪ Derzeit ist es kaum möglich, saisonale Schwankungen und hiervon abweichende klimatische Schwankungen sicher zu detektieren, da die bodenmikrobiologischen Kennwerte an den Basis-BDF und anderen Messprogrammen höchstens 1x pro Jahr ermittelt werden. ▪ Erhebungen zur Charakterisierung der mikrobiellen Aktivität (z.B. Enzymaktivitäten) sind nur vereinzelt auf BDF oder Flächen der Dauerfeldversuche durchgeführt worden und kein fester Bestandteil der Untersuchungsprogramme. ▪ Jahreszeitliche Schwankungen (innerhalb eines Jahres und zwischen verschiedenen Jahren) erschweren die Vergleichbarkeit von Daten. ▪ Bodenenzymuntersuchungen werden derzeit nur selten durchgeführt. ▪ Messungen zur Erfassung der Veränderung der Struktur von mikrobiellen Lebensgemeinschaften werden derzeit in keinem Monitoringprogramm regelhaft erfasst.

Thema	Defizite
Boden-zoologie	▪ BDF dienen als Referenzflächen für die Bewertung von Veränderungen und für die Extrapolation in die Fläche. Da in einigen Bundesländern die Bodenfauna gar nicht, in anderen Ländern nur die Regenwürmer untersucht werden, hat die Referenz Lücken. ▪ Auf BDF werden meist nur Regenwürmer untersucht. Dies ist nicht ausreichend für Aussagen zu Klimawirkungen auf die Bodenbiodiversität und Dienstleistungen der Bodenlebensgemeinschaft. ▪ Fehlende Repräsentanz einzelner Nutzungen unter den BDF in einzelnen Bundesländern in Kombination mit fehlenden Untersuchungen zur Bodenfauna in anderen Bundesländern ergibt einen Mangel an Daten zur Regenwurmfauna für bestimmte Standortkonstellationen. ▪ Wahrscheinlich unzureichende Repräsentanz von Sondernutzungen und Extremstandorten (z.B. Moore, Trockenstandorte). ▪ Ob der Grundwasserflurabstand von grundwasserbeeinflussten BDF in allen Bundesländern in ausreichender zeitlicher Auflösung untersucht wird, ist unklar. Daten zu Gefügeparametern, Lagerungsdichte, Porengrößenverteilung und Humusform werden im BDF-Programm standardmäßig nur einmalig aufgenommen. Für eine Verknüpfung der Veränderung bodenzoologischer Parameter mit Veränderungen dieser Parameter ist das nicht ausreichend, da auch für diese Parameter klimabedingte Veränderungen zu erwarten sind. ▪ Bodenbürtige Pflanzenkrankheiten und -schädlinge werden derzeit auf BDF nicht erfasst. Eine Erfassung über andere Monitoringprogramme ist zu prüfen, da klimabedingte Veränderungen wahrscheinlich sind. ▪ Es fehlt eine europaweit harmonisierte nutzungsübergreifende Klassifikation von Oberboden-Zuständen einschließlich Humusform. Der Oberboden ist das Medium, in dem die biologischen Prozesse größtenteils ablaufen. Gleichzeitig ist er der Teil des Bodenprofils, der vom Klimawandel prioritär betroffen ist. ▪ Die Erfassung der Bewirtschaftung auf BDF erfolgt nicht vollständig und einheitlich, insbesondere auch für Sonderstandorte (SPATZ 2001, BOVA Redaktionsgruppe „BDF/Humus/Klima“ 2010).
Klima-relevante Gase	▪ Es fehlen zeitlich hoch aufgelöste Untersuchungen, über das Jahr ablaufende Freisetzungen und Fixierungen der gasförmigen Verbindungen sowie quantitative Belegung der Quellen-Senkenfunktionen von Böden und validierte Modelle.
Land-nutzung	▪ Ergebnisse aus landwirtschaftlichen Dauerfeldversuchen sind nur zum Teil publiziert und damit verfügbar. Es fehlt eine systematische Etablierung der wichtigsten Bewirtschaftungssysteme in repräsentativen Boden- und Klimaregionen.

Fazit:

Defizite bestehen aufgrund einer zum Teil eingeschränkten Eignung der Messdaten aus Bodenmonitoring und Bodenzustandserhebung für die Beurteilung klimabedingter Veränderungen des Bodenzustands und der Unterschiedlichkeit der der Untersuchungskonzepte einzelner Messprogramme (z.B. Parameterspektrum, Messhäufigkeit, Flächen- und Nutzungsrepräsentanz). Informationen über Bodendaten sind gegenwär-

tig uneinheitlich und liegen verteilt an vielen Stellen vor. Eine harmonisierte, zentrale Datenhaltung erfolgt nur teilweise. Hinzu kommt, dass Formate und Informationssysteme unterschiedlich und nicht ohne weiteres übertragbar oder gemeinsam verwendbar sind. Besondere Schwierigkeiten für eine standort- und messnetzübergreifende Datennutzung bestehen aufgrund der derzeit fehlenden Koordinierung der landwirtschaftlichen Dauerfeldversuche. Ein Zugang zur Gesamtheit der vorhandenen Bodendaten ist daher derzeit nicht gewährleistet. Hinzu kommen Probleme mit der Aussagegenauigkeit von Messdaten, da Veränderungen des Bodenzustands i.d.R. erst nach langen Zeiträumen sichtbar werden und Beprobungs- und Untersuchungsverfahren mit Unsicherheiten behaftet sind.

Handlungsempfehlungen zum Umgang mit den aufgeführten Datendefiziten werden themenspezifisch in Kapitel 3.3 aufgezeigt und in Kapitel 6 zusammengefasst und ergänzt.

3.3 Detaillierte Bewertung der Dateneignung für verschiedene Themen

3.3.1 Nichtstofflicher Bodenzustand und -prozesse – Erosion und Verdichtung

F. Makeschin; M. Abiy; O. Düwel

Vorbemerkung

Im Rahmen der nichtstofflichen Belastungen und Gefährdung der Böden in Deutschland spielen **Wasser- und Winderosion** die Hauptrollen. Wassererosion tritt nahezu flächendeckend auf und wird in allen Bundesländern im Rahmen des Bodenschutzes bearbeitet (BVB 2006). Bodenerosion durch Wind konzentriert sich vor allem auf meeresnahe, ebene Landschaften mit höheren mittleren Windgeschwindigkeiten, leichten Böden und intensiver Bewirtschaftung (DÜWEL 2000, GOOSSENS *et al*. 2001, BARRING *et al*. 2003). Beide Erosionstypen werden durch starke Interaktionen zwischen der Art und der Intensität der Landnutzung, dem Klima, den Bodeneigenschaften und der Topographie gesteuert.

Folgen der Bodenerosion am Standort (sog. On-Site Schäden) sind u.a. eine reduzierte Wasseraufnahmefähigkeit, eine verminderte Speicherkapazität für Wasser und Nährstoffe verbunden mit einer geringeren Bodenfruchtbarkeit, sowie Schäden der wachsenden Kulturen durch Überdeckung mit Sedimenten. Andererseits werden durch Transport von Bodenmaterial über den Standort hinaus auch massive Schäden (sog. Off Site-Schäden) generiert, die sich in der Sedimentation von abgetragenem Bodenmaterial (Silting) in Gewässern, deren Eutrophierung, der Überdeckung von Verkehrswegen oder der Beeinträchtigung des Land- und Luftverkehrs durch Staub äußern und beachtliche wirtschaftliche Schäden verursachen können. Wenngleich es an systematischen Erhebungen über erosionsbedingte wirtschaftliche Schäden bislang fehlt, deuten einzelne Aussagen auf das u. U. bedeutende Ausmaß hin. So schätzte EPPINK bereits 1982 die direkten durch Winderosion verursachten Kosten für die Niederlande auf 20 Mio. Gulden (ca. 9 Mio. Euro) pro Jahr. DOLESCHEL und HEIßENHUBER gingen 1991 von bis zu 30 Mio. DM (ca. 15 Mio. Euro) aus, die jährlich für die Beseitigung von Offsite Schäden aus Wassererosion allein für Bayern aufgewendet werden mussten.

Die **(Schad-)Verdichtung** von Böden hat während der letzten Jahrzehnte auf Grund größer werdender Achslasten von Zugfahrzeugen, Anhängern und Erntemaschinen stark zugenommen. Die Bodenverdichtung betrifft Ober- und Unterböden landwirt-

schaftlicher Standorte weit über den Vorbelastungszustand hinaus und im Rahmen der Mechanisierung von Durchforstungs- und Erntemaßnahmen zunehmend auch bislang nicht verdichtete Waldstandorte. Negative Wirkungen sind Störungen der Produktions- und Umweltfunktionen der Böden, so der Infiltration, des Luft-, Wasser- und Nährstoffhaushalts der Böden und Gefügeschäden.

Hypothese:
Klimaänderung und veränderte Saisonalitäten verändern die Risiken für Erosion durch Wasser und Wind und für bewirtschaftungsbedingte Bodenverdichtungen.

Hinsichtlich der zu erwartenden nicht-stofflichen Veränderungen der Böden müssen vor allem eine höhere Gefährdung durch Wasser- und Winderosion, eine Zunahme der Bodenschadverdichtung wie auch negative Änderungen des Gefügezustands beachtet werden. Es ist davon auszugehen, dass die durchschnittlich stärkere Erwärmung v.a. im Süden und Osten Deutschlands wie auch regional sehr differenzierte Veränderungen der Niederschläge als unmittelbare und mittelbare Faktoren auf Böden wirken (siehe Tab. 1.1). So sind insbesondere direkte Wirkungen über zunehmende Starkregenereignisse und ein indirekter Einfluss über geringere Deckungsgrade der Kultur- und Zwischenfrüchte als Konsequenz der Abnahme der Sommerniederschläge im Osten und Südwesten Deutschlands zu erwarten. In Gebirgsregionen mit hoher Reliefenergie dürfte die Gefahr von Boden- bzw. Hangrutschungen selbst unter Dauerwald steigen.

Verschiebungen der Saisonalität mit vermehrt nassen Perioden im Spätwinter bzw. Frühjahr und im Herbst überlagern sich mit bewirtschaftungsbedingten Befahrungs- und Bearbeitungsspitzen auf landwirtschaftlichen Standorten. Dadurch erhöhen sich die bodenphysikalischen Belastungen und die Risiken der Verdichtung von Ober- und Unterböden. Bewirtschaftungsbedingte Schadverdichtungen in den Böden sind vor allem auf wenig befahrenen forstlichen, mechanisch unbelasteten Standorten zu erwarten, wenn mildere, frostfreie Winter im Zusammenhang mit höheren Niederschlägen die Zeitkorridore der Befahrbarkeit weiter einschränken.

Klimaänderungen und Wirkungsprognose – Bodenerosion

Bodenabträge durch Wasser- oder Winderosion sind abhängig von den Faktoren Klima, Bodeneigenschaften, Relief und Bewirtschaftung (Bodenbearbeitung, Bodenbedeckung, weitere Schutzmaßnahmen). Wie sich die Erosionsdisposition zukünftig entwickeln wird, ist von der Entwicklung der Einzelfaktoren abhängig. Änderungen der Einzelfaktoren können sich wiederum klimabedingt mittelbar oder unmittelbar auswirken. So sind unmittelbare Wirkungen insbesondere über zunehmende Starkregenereignisse (Wassererosion) oder veränderte Windverhältnisse (Winderosion) zu erwarten. Mittelbare Folgen können sich aus einem geringeren Deckungsgrad der Kultur- und Zwischenfrüchte als Konsequenz der Abnahme der Sommerniederschläge ergeben.

In Tabelle 3.10 sind die möglichen unmittelbaren und mittelbaren Wirkungen möglicher Klimaänderungen auf die die Bodenerosion bestimmenden Faktoren sowie deren Einfluss auf Wasser- und Winderosion zusammengefasst.

Tab. 3.10: Faktoren und Wirkungen der Bodenerosion

Erosionsfaktoren	**Einfluss der Faktoren auf**		**Einfluss der Klimaänderung**
	Winderosion	**Wassererosion**	
Klima			
Niederschlag	(X)	X	X
Temperatur	(X)	(X)	X
Wind	X	(X)	(?)
Luftfeuchte	X	(X)	(X)
Bodeneigenschaften			
Bodenart	X	X	
Humusgehalt	X	X	X
Infiltrabilität		X	(X)
Bodenfeuchte	X	X	X
Rauhigkeit	X	X	(X)
Krustenbildung	X	X	(X)
Bewirtschaftung			
Bodenbedeckung	X	X	X
Bodenbearbeitung	X	X	(X)
Topographie/Relief	X	X	

X unmittelbar (X) mittelbar (?) keine gesicherten Erkenntnisse

a) Klimatische Faktoren

Niederschlag

Klimaszenarien zeigen, dass die bereits beobachteten Änderungen der Intensität und Höhe der Niederschläge sowie deren Umverteilung regional differenziert weiter zunehmen werden. Diese Änderungen besitzen aus verschiedenen Gründen einen Einfluss auf die Bodenerosion: Der wichtigste Faktor dabei ist die Änderung der erosiven Kraft der Niederschläge. Die Bodenerosion wird sowohl von der Niederschlaghöhe als auch von der Niederschlagsintensität beeinflusst, wobei der Einfluss der Niederschlagsintensität und -energie stärker ausgeprägt ist als derjenige der Niederschlagsmenge (NEARING et al. 2005, FAVIS-MORTLOCK & GUERRA 1999). In einer Studie von PRUSKI & NEARING (2002) wurde gezeigt, dass sich bei Erhöhung der Niederschlagsmenge um einen Prozentpunkt die Erosionsrate um 0,85 % ändert, sofern dabei die Niederschlagsintensität konstant bleibt. Wenn aber sowohl die Menge als auch die Intensität der Niederschläge gleichzeitig proportional zunehmen, wird sich die Erosionsrate für jede Verschiebung der Niederschlagsmenge von 1 % um 1,7 % verstärken.

Ein weiterer potentieller Einfluss der Klimaänderung ist die Veränderung des Verhältnisses der Menge des Schneefalls zum Niederschlag. Wenn die Anzahl der Tage mit Schneefall abnimmt und die mit gewitterbedingten Niederschlägen zunimmt, ist davon auszugehen, dass die Erosion ansteigt.

Wind

Die die Winderosion beeinflussenden klimatischen Faktoren können in zwei Hauptgruppen aufgeteilt werden: Windgeschwindigkeit und Luft- bzw. Bodenfeuchte. Der Wind ist dabei die wichtigste treibende Kraft. Bisher sind allerdings keine konsistenten und allgemein akzeptierten Anhaltspunkte über eine langfristige und dauerhafte Änderung der Windverhältnisse bekannt (ALEXANDERSSON *et al.* 2000, CARRETERO *et al*. 1998, MEEHL *et al*. 2000, IPCC 2001), obwohl die zyklonale Aktivität und Sturmhäufigkeit im nordatlantischen Raum und angrenzenden europäischen Regionen Gegenstand vieler Modellstudien waren.

Mit einer Abnahme des Niederschlages und einer Zunahme der Temperatur würde die Winderosion in ariden und semiariden Gebieten, sehr wahrscheinlich aber auch in Gebieten mit längeren Trockenperioden linear ansteigen. Durch die Zunahme der Temperatur würde sich die Evaporationsrate erhöhen und eine Abnahme des Bodenwassergehalts bewirken. Dadurch käme es zur Reduktion der Bodenbedeckung und der Biomassenproduktion. Diese Bedingungen können die Zunahme der Geschwindigkeit und der erosiven Kraft des Windes begünstigen (LEE et al. 1996).

Bisher fehlen verlässliche Aussagen, ob und in welchem Ausmaß sich die Klimaänderung direkt auf Windrichtung und Windgeschwindigkeit auswirken wird. Ergebnisse aus den Auswertungen meteorologischer Daten der letzten Jahrzehnte zeigen regional sowohl Gebiete abnehmender als auch zunehmender Windgeschwindigkeiten (BÖHNER et al. 2004).

b) Bodenbedeckung

Die Bodenbedeckung durch Vegetation oder organische Materialien wie Ernterückstände oder Mulch hat sowohl auf Winderosion als auch auf Wassererosion einen erheblichen Einfluss. Beide Faktoren schützen den Boden dauerhaft und wirkungsvoll vor Bodenverwehung; bereits ab einem Bedeckungsgrad von 30 – 40 % ist die Winderosion zu vernachlässigen (RIKSEN 2006). Eine Bodenbedeckung schützt den Boden weiterhin vor der Wirkung der Regentropfen und deren kinetischer Energie.

Die Mechanismen, über die Klimaänderungen die pflanzliche Biomasse und damit mittelbar die Bodenerosion beeinflussen, sind sehr komplex. Eine Temperaturerhöhung kann einerseits durch eine Verlängerung der Vegetationsperiode zu einer Erhöhung der Biomassenproduktion führen (veränderte Phänologie, z.B. frühere Aussaat), andererseits ist davon auszugehen, dass Pflanzenwachstum und Bestandesdeckung durch höhere Temperaturen (z.B. Trockenstress) oder durch Extremereignisse (wie Hagelschäden und Schädlingsbefall) abnehmen.

Auch ein Anstieg der atmosphärischen Kohlendioxidkonzentration kann infolge eines CO_2-Düngungseffekts und einer höheren Wassereffizienz das Pflanzenwachstum forcieren. Bedingt dadurch dürfte sich der Bedeckungsgrad von Böden durch die Vegetation und insbesondere auch Rückwirkungen über den Bestandesabfall und Ernterückstände auf den Humushaushalt der Böden positiv verändern und somit die Erosion

vermindern. Entscheidend wird dabei die Entwicklung der pflanzenverfügbaren Wassergehalte im Boden sein; so weisen Modelluntersuchungen auf die zentrale Rolle der oberirdischen Pflanzenwachstums und der Bodendeckung hin (NEARING et al. 2005).

c) Bodeneigenschaften

Humusgehalt

Das Biomassewachstum beeinflusst unmittelbar die Menge des ober- und unterirdischen Streueintrages in den Boden. Die Zunahme der Luft- und Bodentemperatur kann zu einem erhöhten Abbau von organischer Substanz im Boden durch Erhöhung der bodenbiologischen Aktivität führen (KOLBE 2009; PREGER *et al.* 2006; BELLAMY *et al*. 2005). Eine Abnahme des Humusgehaltes im Boden würde das Bodengefüge destabilisieren und damit die Erodierbarkeit der Böden durch Wind und Wasser erhöhen.

Bodenfeuchte und Infiltrationsvermögen

Bodenfeuchte und Infiltrationsvermögen von Böden sind wichtige Parameter für die Bildung von Oberflächenabfluss als initialem Prozess von Wassererosion. Insbesondere Bodenfeuchte beeinflusst ebenfalls die Winderosion. Trockenere Bodenbedingungen werden daher die Anfälligkeit von Böden für Winderosion unter erosiven Windverhältnissen (Windgeschwindigkeit und relative Luftfeuchte) erhöhen (OLESEN UND BINDI 2002).

Entscheidend für den Bodenwassergehalt ist die Evapotranspirationsleistung der Vegetation und der Bodenoberfläche selbst, die Temperatur und die Niederschlagsmenge. Eine Änderung der atmosphärischen Kohlendioxidkonzentration kann nicht nur zum veränderten Biomassenwachstum, sondern auch zu veränderten Transpirationsraten führen und somit den Bodenwassergehalt beeinflussen. Erhöhte Temperaturen steigern ebenfalls die Verdunstungsraten und resultieren in verminderten Bodenfeuchten, während eine Zunahme der Niederschläge höhere Bodenfeuchte bewirken. Veränderte Abflussbildungsbedingungen wären die Folge.

Andererseits werden Temperaturerhöhung und Verschiebungen der Saisonalität die Bodenfrostperioden im Winter verkürzen, so dass die Wasseraufnahmefähigkeit erhöht wird. Bei Niederschlägen oder einsetzender Schneeschmelze kann damit die Gefahr des Oberflächenabflusses zurückgehen.

Sonstige Bodenparameter

Als weitere, für das Erosionsgeschehen wichtige Oberflächeneigenschaften der Böden, sind Aggregierung (Oberflächenrauhigkeit) und Krustenbildung zu nennen, die klimabedingt beeinflusst werden können (höhere Stabilität der Bodenteilchen durch weniger Frost, Verschlämmung durch Starkregen) (NEARING et al. 2004).

d) Sozioökonomische Rahmenbedingungen

Schließlich können Klimaänderungen auch sozioökonomischen Rahmenbedingungen verändern und damit sowohl einen fördernden als auch hemmenden Einfluss auf die Entwicklung der Erosion ausüben. Dazu zählen u.a. Änderungen von Marktbedingungen (z.B. Anreize zum verstärkten Anbau von Energiepflanzen oder Anbau ertragsorientierter Marktfrüchte) oder Anpassungsstrategien der Landwirtschaft wie beispielsweise eine reduzierte Bodenbearbeitung, Diversifizierung der Fruchtfolgen und Agrarfördermaßnahmen.

Eine genaue Prognose über Art und Intensität der Entwicklung der sozioökonomischen Rahmenbedingungen ist jedoch sehr schwierig. Wenn die Landwirtschaft auf die Klimaänderung im Rahmen geeigneter Anpassungsstrategien mit Einführung neuer Pflanzenarten bzw. Varietäten, ressourcenschonender Bodenbearbeitung oder einem veränderten Landnutzungsmuster reagiert, lassen sich die Erosions- und Sedimentationsverhältnisse in den betreffenden Einzugsgebieten vollständig ändern.

Zur Frage, wie sich der Klimawandel quantitativ in Bezug auf die Bodenerosion äußert, sei abschließend auf einige Arbeiten verwiesen, die in Tabelle 3.11 zusammengestellt sind. Sie belegen grundsätzlich ein zunehmendes Bodenerosionsrisikos, zeigen aber auch eine außerordentlich hohe Variation der Trends und damit verbundener hoher Unsicherheiten hin.

Tab. 3.11: Ergebnisse von Studien über den Einfluss der Klimaänderung auf die Wassererosion (nach SCHOLZ et al. 2008, ergänzt)

Quelle	Untersuchungs-gebiet	Modelle und Methoden	Parameter	Bodenerosion
FAVIS-MORTLOCK & BOARDMAN (1995)	GB South Downs	2 * CO_2 Klimaszenario WXGEN EPIC	Niederschlagsmenge	+150 %
FAVIS-MORTLOCK & GUERRA (1999)	Mato Grosso, Brasilien	HADCM2, WEPP	Niederschlag Temperatur CO_2	Jahresmittel: +27 %
NICKS (2003)	USA, 69 Standorte	2 * CO_2 Klimaszenario CLIGEN EPIC	Mittlere Temperatur, Niederschlagmenge und -häufigkeit	+11 % bis +84 %
PRUSKI & NEARING (2002)	verschiedene Standorte in den USA	WEPP	Mittlere Temperatur, Niederschlagmenge und -intensität	+ 0,85 bis + 2,38 % pro 1 % Niederschlags-zunahme
MICHAEL et al., (2005)	2 Standorte in Sachsen, Deutschland	ECHAM4-OPYCS, EROSION 3D	Niederschlags-intensität/-extreme Wetterereignisse	+22 bis + 66 %
ZHANG & NEARING (2005)	El Reno, Oklahoma USA	HadCM3 CLIGEN WEPP	Niederschlag Temperatur Bodenbearbeitung Pflanzenwachstum	+18 bis + 30 %
RIPPEL & STUMPF (2008)	Bayern, Deutschland	ECHAM4 / B2 / WETTREG 2004 ABAG	Niederschlag, Fruchtfolge Bodenbearbeitung	+3 bis + 26 %
RIPPEL & STUMPF (2008)	Bayern, Deutschland	ECHAM5/ A1B/ WETTREG 2006 ABAG	Niederschlag, Fruchtfolge Bodenbearbeitung	-6 bis +10 %
SCHOLZ et al., (2008)	Oberösterreich	HadRM3H SRES A2 LARS WG3.0 MMF	Niederschlagsmenge und -verteilung	-11 bis + 24 %

Klimaänderungen und Wirkungsprognose - Bodenverdichtung

Grundsätzlich verstärken verdichtete Böden auf Grund der geringen Infiltrationskapazität für Niederschläge und des höheren Oberflächenabflusses die Gefährdung durch Wassererosion und fördern nach Starkregen das Auftreten von Hochwasserereignissen. Verdichtete Böden neigen darüber hinaus stärker zur Vernässung und reduzierter Grundwasserneubildung und emittieren verstärkt Lachgas, Methan und Kohlendioxid. Böden fungieren dann als Quelle für treibhausrelevante Gase (vgl. Kap. 3.3.6).

Eine Gefährdung von Böden durch Schadverdichtungen und Störungen des Bodengefüges im Rahmen des Klimawandels ist dann zu erwarten, wenn im Rahmen der angenommenen regionaltypischen Veränderungen der Niederschlagsereignisse sich Nässeperioden in bewirtschaftungsbedingt erhöhte Befahrungen hinein verschieben. Im landwirtschaftlichen Sektor wäre dies bei früherer Frühjahrsbestellung, während Pflegemaßnahmen oder in den Ernteperioden der Fall. Der Schwerpunkt forstlicher Durchforstungs- und Erntemaßnahmen liegt während der Vegetationsruhe und bevorzugt in Frostphasen; die prognostizierten Änderungen mit milderen Wintern und erhöhten Winterniederschlägen überlappen sich damit mit den Befahrungsspitzen und erhöhen die Verdichtungsgefährdung. Bislang liegen jedoch noch keine systematischen wissenschaftlichen Erkenntnisse zu den Auswirkungen des Klimawandels auf Bodenverdichtungen und Gefügestörungen vor; Überlegungen hierzu finden sich nur allgemein im Rahmen der Effekte auf die Landnutzung (FALLOON & BETTS 2009).

In einem vom Umweltbundesamt geförderten Vorhaben (FKZ 3707 71 202) wurden bodenphysikalisch fundierte Grundlagen zur Abschätzung der tatsächlichen, standortabhängigen Verdichtungsgefährdung erarbeitet (LEBERT 2010). Als erstes Ergebnis der mechanischen Verdichtungsempfindlichkeit auf Basis der nutzungsdifferenzierten Bodenkundlichen Übersichtskarte der Bundesrepublik Deutschland im Maßstab 1 : 1.000.000 (BÜK 1000) ergab sich, dass ca. 68 % der Flächen bei einer Bodenfeuchte von pF 1,8 eine hohe bis sehr hohe Gefährdung der Bodenfunktionen durch Verdichtung im Unterboden aufweisen (LEBERT 2010). Betroffen sind vor allem die Jungmoränenlandschaften, der Lössgürtel, das Tertiärhügelland und die Marschen der Küstenregion. Mit Hilfe dieser Auswertungskarte ist es erstmals möglich, eine Flächenabschätzung der verdichtungsempfindlichen Standorte vorzunehmen. Als Grundlage hierzu wurden die Gefügeeigenschaften unter Aspekten der Bodenverdichtung in Ab-

hängigkeit von den Kenngrößen Luftkapazität, gesättigte Wasserleitfähigkeit und effektive Lagerungsdichte klassifiziert und über die BÜK 1000 N dargestellt.

Datenbedarf, Datenangebot und Dateneignung

Wie die Ausführungen im vorangehenden Abschnitt verdeutlichen, können klimabedingte Änderungen der **Bodenerosion** hauptsächlich durch genauere und hoch aufgelöste Klimadaten diagnostisiert werden. Der Grund dafür ist, dass viele Parameter der Bodenerosion direkt oder indirekt durch das Klima beeinflusst werden. Je nach den verwendeten Klimamodellen können Erosionsprognosen daher sehr stark von einander abweichen (vgl. Tab. 3.11).

Tabelle 3.12 gibt einen Überblick über erosionsrelevante Parameter, die im Rahmen von Monitoringprogrammen oder (Dauer-)Feldversuchen erhoben werden. Als wichtigsten klimasensitiven Erosionsparameter liefern diese Programme den Humusgehalt. Die übrigen Parameter im Bodenmonitoring sind entweder nicht oder wenig klimasensitiv (z.B. Bodenart, Trockenrohdichte) bzw. sie eignen sich nicht, eine klimabedingte Änderungen des Erosionsrisikos direkt zu belegen.

Darüber hinaus sind die in Tabelle 3.12 genannten Boden-Dauerbeobachtungsflächen (BDF) und Feldversuche plotbezogen ausgerichtet. Aussagen über Repräsentativität von plotbezogenen Erosionsmessungen sind i.d.R. ebenso schwierig wie notwendige Regionalisierungsansätze, um flächenhafte Aussagen treffen zu können. Ausnahmen bilden Untersuchungen, bei denen weitere Methoden zum Einsatz kommen, die das jeweilige BDF-Programm erweitern (beispielsweise Erosionsereignis-bezogene Schadenskartierungen, die in Niedersachsen im Rahmen des BDF Programms durchgeführt werden (MOSIMANN et al. 2009).

Allgemein gilt, dass Bodenerosion ein flächenhaftes Ereignis ist, welches beim Zusammentreffen der verschiedenen Erosionsfaktoren auftritt. Punktuell vorliegende Daten des gegenwärtigen Bodenmonitorings (vgl. Anlage 2.6) eignen sich daher nur bedingt für die Abschätzung einer klimabedingten Erosionsgefährdung.

Tab. 3.12: Punktuell vorliegende erosionsrelevante Parameter der Monitoring- und Erhebungsprogramme und der Landwirtschaftlichen Dauerfeldversuche (Auswahl)

Programme	Bodenparameter			Landnutzung
	C_{org} oder Humusgehalt	Bodenart	Trockenrohdichte	
BDF	X	X	X	Wald/Acker/Grünland
BZE I	X			Wald
BZE II	X	X	X	Wald
Level II	X	X	X	Wald
Landwirtschaftliche Dauerfeldversuche	X	X	X	Acker
Bodenschätzung	X	X		Acker/Grünland

Hinsichtlich der Problematik von **Bodenschadverdichtungen** liegen für forstliche Standorte bisher noch keine konsensfähigen Bewertungsansätze vor. Dem gegenüber wurde von der VDLUFA für landwirtschaftlich genutzte Böden bereits ein Belastungsquotient im Rahmen eines Betriebsbewertungskonzeptes „Umweltsicherungssysteme Landwirtschaft“ integriert (ECKERT et al. 2002). Letzteres sieht die Druckbelastbarkeit überschritten, wenn die Luftkapazität in Oberböden unter 8 Vol.-% und in Unterböden unter 5 Vol.-% sinkt. Diese Werte werden als kritische Kenngrößen für die Durchlüftbarkeit der Böden im Hinblick auf die Lebensraumfunktion der Böden und das Pflanzenwachstum eingestuft.

Weiterhin liegen für die Bewertung von Schadverdichtungen bzw. der Verdichtungsempfindlichkeit die Konzepte Vorbelastung, Druckbelastbarkeit, Befahrbarkeitsrichtlinien und Schadverdichtungsklassen vor (DIN 1998, TLL 2009). Die Konzepte Vorbelastung *und* Druckbelastbarkeit schätzen die Bodeneigenschaft Druckbelastbarkeit für wahrscheinliche Bodenwassergehalte mittels bodenartbezogener Regressionsgleichungen ein (DVWK 1995, HORN et al. 1991, NISSEN 1998). Vorteile des Konzeptes sind der Standortbezug und die Einbeziehung volumetrischer und mechanischer Gefüge- und Materialeigenschaften. Das Konzept Befahrbarkeitsrichtlinien verwendet Klassen der Druckempfindlichkeit und vergleicht sie mit dem „fahrzeugbedingten Bodendruck“ (TLL 2009). In einem Schema werden akzeptable und nicht akzeptable Situationen ausgewiesen, allerdings wird in diesem Konzept die Standortspezifik nicht berücksichtigt. Die Schadverdichtungsgefährdungsklassen stellen einen linearen Zusammenhang zwischen Trockenrohdichte und Ertrag mit nachteiliger Ertragsbeeinflussung her.

Das Konzept wurde allerdings bislang nur auf wenigen Jungmoränenstandtorten validiert.

In dem vom Umweltbundesamt geförderten Vorhaben (FKZ 3707 71 202; LEBERT 2010) fanden vor allem Daten aus Erhebungen zur Dauerbeobachtung und einer begleitenden Landesaufnahme Verwendung. Neben Informationen zur Profilansprache (Geo- und Pedogenese, Stratigraphie, Horizontfolge und Gefügeansprache) fließen allgemeine Bodenkenngrößen (Bodenart, Skelettgehalt, Carbonat- und Humusgehalt) ein, die durch spezifische physikalische Parameter ergänzt werden (Luftkapazität, nFK, Totwassergehalt, Trockenrohdichte, k_f-Wert).

Eingangsdaten für Modellierungen

Für eine Abschätzung des Erosionsrisikos und die Einleitung von langfristigen Erosionsschutzmassnahmen sind Vorhersagemodelle besser geeignet als direkte Erosionsmessungen. Letztere sind jedoch für die Kalibrierung und Validierung von Vorhersagemodellen unerlässlich.

Für die Vorhersage des Erosionsgeschehens befinden sich zahlreiche empirische, konzeptionelle sowie physikalisch basierte Modelle sowohl für Wasser- als auch Winderosion in der Anwendung (siehe Tab. 3.13 und 3.14). Welche Modelle sich für die Abschätzung eines durch die Klimaänderung bedingten Erosionsrisikos am besten eignen, wird in Fachkreisen derzeit noch kontrovers diskutiert. Modellvergleichsstudien zeigen, dass die absoluten Zahlen der Modellergebnisse unter gleichen Ausgangsbedingungen sehr stark von einander abweichen können, während die relativen Zahlen der meisten Modelle auf einen ähnlichen Trend hindeuten (FAVIS-MORTLOCK 1998). Weiterhin wird davon ausgegangen, dass die häufig verwendeten empirischen Modelle (wie die ABAG) die nicht-lineare Reaktion des Erosionsgeschehens nicht hinreichend abbilden können, weil diese Modelle für eine lineare Reaktion als Funktion der einzelnen erosionsbeeinflussenden Faktoren vorgesehen sind (NEARING et al. 2005; FAVIS-MORTLOCK & BOARDMAN 1995).

Tab. 3.13: Wassererosionsmodelle (Auswahl)

Modellbezeichnung	**Typ***
AGNPS (Agricultural Non-Point Source pollution model)	C
ANSWERS (Areal Nonpoint Source Watershed Environment Response Simulation)	P
CREAMS (Chemicals, Runoff and Erosion from Agricultural Management Systems)	P
EPIC (Erosion-Productivity Impact Calculator)	P
EROSION-3D (Einzugsgebietmodell)	P
EROSION-3D (Hangmodell)	P
EUROSEM (European Soil Erosion Model)	P
GUEST (Griffith University Erosion System Template)	P
KINEROS2	P
LISEM (Limburg Soil Erosion Model)	P
MEDRUSH	P
MOSES (Modular Soil Erosion System)	
PESERA (Pan-European Soil Erosion Risk Assessment)	C
USLE (Universal Soil Loss Equation) ~ ABAG	E
RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation)	E
MUSLE (Modified Universal Soil Loss Equation)	E
SERAE (Soil Erosion Risk Assessment in Europe)	
STREAM (Sealing, Transfer, Runoff, Erosion, Agricultural Modification)	
SWAT (Soil and Water Assessment Tool)	
WaTEM/SEDEM	
WaSIM-ETH	
WEPP (Water Erosion Prediction Project)	P

* C konzeptionell, P physikalisch-basiert, E empirisch

Tab. 3.14: Winderosionsmodelle (Auswahl)

Modellbezeichnung	Typ
WEQ (Wind erosion Equation)	E
WEPS (Wind Erosion Prediction System)	P
RWEQ (Revised Wind Erosion Equation)	P
WEELS (Wind Erosion on European Light Soils)	P

Für eine detaillierte Information zu Modellvergleichen wird an diese Stelle auf die Arbeiten von HEBEL (2003), MERRITT *et al.* (2003), FAVIS-MORTLOCK (1998), AKSOY und KAVVAS (2005), NEARING et al. (2005) sowie JETTEN et al. (1999) verwiesen. Trotz der oben genannten Einschränkungen hat sich das empirisch Modell ‚ABAG' auf Grund des geringen Datenbedarfs und dessen einfache Handhabung als praxistaugliches Modell zur Abschätzung der flächenhaften Erosion im Ackerbau besser bewährt als die komplexeren, physikalisch-basierten Modelle (MERRITT et al. 2003). In der Theorie sind die Parameter der physikalisch-basierten Modelle messbar und als solche „bekannt". In der Praxis muss aber auch ein Großteil der beteiligten Parameter sehr oft ebenfalls an Hand von gemessenen Daten kalibriert werden (MERRITT et al. 2003).

Eine Übersicht über die in den deutschen Bundesländern eingesetzten Methoden und Datengrundlagen gibt der BUNDESVERBAND BODEN (BVB) (2006) (vgl. Abb. 3.4). Danach werden überwiegend die ABAG oder daraus abgeleitete Modelle und Richtwerte (DIN 19708) für die Abschätzung des Erosionsrisikos durch Wasser angewendet. Im Freistatt Sachsen wird zurzeit das physikalisch basierte Modell EROSION 2D/3D Flächendeckend eingesetzt. Für eine Bewertung des Datenbedarfs werden daher im Anhang die Modelle ABAG und EROSION 2D/3D stellvertretend betrachtet (vgl. Anlage 2.1 und 2.2).

Der BVB bereitet derzeit in Zusammenarbeit mit der Deutschen Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (DWA) Merkblatt zu Handlungsempfehlungen vor, um im Kontext der EU WRRL Aussagen über erosionsbedingte Stoffeinträge in Oberflächengewässer treffen zu können. In dem Merkblatt werden Kriterien formuliert, um geeignete Modelle auswählen zu können (u.a. räumliche Skala, Validierung, Dokumentation, Berücksichtigung unterschiedlicher Erosionsprozesse, abzubildende

Schutzmaßnahmen). Die mit der Erstellung des Merkblattes befasste Arbeitsgruppe hat 20 in Deutschland verwendete Modelle bewertet und am Ende 5 Modelle ausgewählt, die die Kriterien weitestgehend erfüllen. Es sind dies die in Tabelle 3.13 u.a. aufgeführten Modelle WaTEM/SEDEM (van OOST et al. 2000, van ROMPAEY et al. 2001, VERSTRAATEN et al. 2002), AGNPS bzw. AnnAGNPS (BINGER et al 2006), SWAT (KRYSANOVA et al. 1998), WaSIM-ETH mit AGNPS (LINDENSCHMIDT et al. 2004) und EROSION3D (SCHMIDT et al. 1996).

Bei der Winderosion ist die Anzahl der verfügbaren Modelle stark eingeschränkt. In den Bundesländern werden bisher Winderosionsmodelle flächendeckend nur begrenzt eingesetzt (z.B. in Mecklenburg-Vorpommern, RWEQ, FUNK & VÖLKER (1998), in Niedersachsen, WEELS, BÖHNER et al. (2004)). In den Anlagen 2.3 und 2.4 sind beispielhaft die Eingangsparameter von zwei Winderosionsmodellen dargestellt.

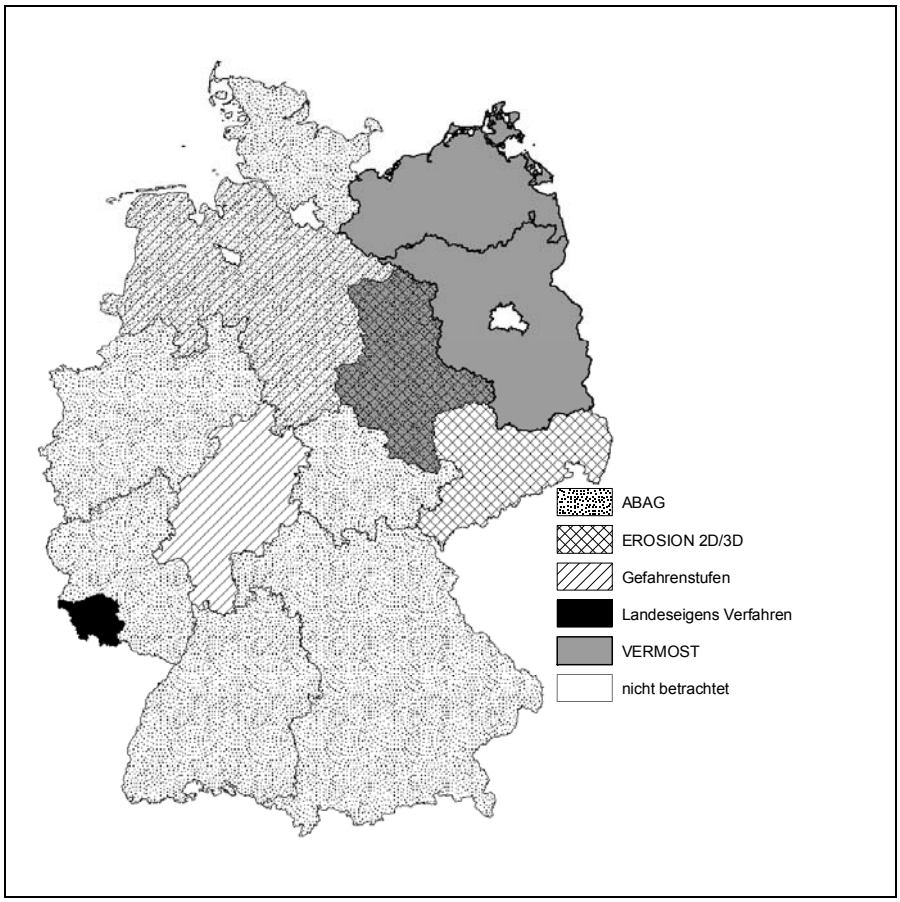


Abb. 3.4: In den Bundesländern im Wesentlichen eingesetzte Modelle zur Prognose der Wassererosion (nach BUNDESVERBAND BODEN 2006)

Da wie eingangs erwähnt Änderungen des Erosionsgeschehens in erster Linie aus Klimaänderungen resultieren, kann für die Modellierung und Methodenanwendungen auf vorhandene geeignete Boden-, Relief- und Landnutzungsdaten zurückgegriffen werden. Dafür liegen Daten bei

- den staatlich geologischen Diensten,
- den Umweltverwaltungen,
- den landwirtschaftlichen Behörden, oder
- den Finanzverwaltungen (Bodenschätzungsdaten)

vor. Für die Anwendung von Erosionsmodellen sind vor allem regionalisiert vorliegende Daten von Bedeutung.

Im bundesweiten Übersichtsmaßstab (Maßstab 1 : 1.000.000) liegt eine Abschätzung der potenziellen Erosionsgefährdung durch Wasser auf Grundlage der Methodendokumentation der AD-HOC-AG BODEN (2000) von HENNINGS (2003) vor. Weiterhin sind für weitergehende Anwendungen von Erosionsmodellen auf dieser Maßstabsebene folgende digitale Kartenwerke verfügbar:

- Karte der Gehalte an organischen Substanzen im Oberboden Deutschlands,
- Karte der Bodenarten von Oberböden Deutschlands,
- DGM-Deutschland (25 bzw. 50 m Auflösung).

Da der Humusgehalt im Boden ein veränderlicher Parameter ist, muss für die Parametrisierung der Erosionsmodelle auf Ergebnisse von C-Modellen und C-Monitoring-Programmen zurück gegriffen werden (siehe Kap. 3.3.3).

Räumliche Aussagen zu Bodenzustand und dessen Veränderungen

In Abhängigkeit von den eingesetzten Modellen können Aussagen über die Erosionsrisiken von Einzelhängen und Einzugsgebieten bis hin zur Bundesebene getroffen werden. Voraussetzung dafür sind verlässliche, räumlich hoch aufgelöste Klimadaten (s.o.).

Für die Modellierung der Bodenerosion unter den Bedingungen des Landnutzungswandels ist es nötig, die Veränderungen der einzelnen Eingabeparameter zu quantifizieren (Veränderung der Phänologie / Einsaat / Ernte, C_{org}-Gehalte im Boden, Bodenbedeckung, Wassergehalte, etc.). Dafür ist eine enge Vernetzung der bodenbezogenen Monitoring- und Erhebungssysteme mit laufenden Klimafolgeforschungsprojekten nötig.

Empfehlungen für künftige(s) Monitoring und Erhebungen

Sowohl die Wasser- als auch die Winderosionsdynamik wird bereits unter den heute vorherrschenden Bedingungen sehr komplex durch natürliche und bewirtschaftungsbedingte Faktoren gesteuert. Sieht man von einem gehäuften Auftreten von Extremereignissen der Witterung wie Starkniederschlägen oder langen Trockenperioden auf leichten Sandstandorten einmal ab, so ist es i.d.R. nicht möglich den Einfluss der schleichend verlaufenden Klimaänderung von anderen Faktoren, die unabhängig voneinander während eines Beobachtungsintervalls ablaufen, zu unterscheiden. Wassererosion ist mit dem Auftreten von Starkregenereignissen, die sowohl zeitlich als auch räumlich uneinheitlich sind, verbunden. So können bei gleicher potentieller Erosionsgefährdung von Standorten erosive Kräfte bewirtschaftungsbedingt unterschiedlich einwirken. Ein flächenrepräsentatives Monitoring ist daher oft nicht möglich, weil es in der Regel nicht nur auf die Vergleichbarkeit von Standorten, sondern auf die Vergleichbarkeit aller die Erosion beeinflussenden Faktorenkombinationen ankommt.

Grundsätzlich kommen die im Folgenden vorgestellten **Erosions-Monitoringverfahren** in Betracht:

<u>I. Direkte Methoden:</u>

1. Plotstudien

<u>Vorteil:</u> Monitoringplots erlauben eine präzise Kontrolle der Bewirtschaftungsbedingungen und eine akkurate Messung des Oberflächenabflusses und des Bodenabtrages der betreffenden Fläche. Replikate können verwendet werden, um Mittelwerte zu bilden und um durch Extremereignisse oder extreme Bedingungen bedingte systematische Fehler zu minimieren. Wiederholungen sind ebenfalls wichtig, um Variationen zwischen vermeintlich identischen Standorten zu überprüfen. Schließlich besteht die

Möglichkeit, verschiedene Bewirtschaftungsszenarien hinsichtlich deren Wirkungen auf die Bodenerosion zu untersuchen. Plotstudien erfassen die zeitliche Variation besser als z.B. Feldbeobachtungen (GOBIN et al. 2004).

Nachteil: Plots werden i.d.R. dort eingerichtet, wo Bodenerosion von vornherein zu erwarten ist, so dass plotbasierte Erosionsmessungen nur die unmittelbare Nähe des Plots repräsentieren und die Erosionsrate der umliegenden Landschaften überschätzen (EVANS 1995). Es muss auch betont werden, dass Plotstudien nur einen aggregierten Output über die betreffende Fläche, aber keine detaillierte Redeposition oder Umverteilung innerhalb der Fläche reflektieren (WALLING & QUINE 1990). Weiterhin findet Bodenabtrag (und auch Bodenauftrag an Unterhängen) nicht homogen auf der Fläche statt; daher ist es irreführend von einem Abtrag in Form von Masse pro Flächeneinheit zu sprechen.

Nach BRAZIER (2004) ist die Einschränkung der Plots durch eine künstliche Begrenzung auch ein potentielles Problem. Viele Plotstandorte können dadurch die Bedingungen der umliegenden Flächen nicht abbilden, da ihre Grenzen die Konvergenz und Divergenz von Abflussbahnen in und aus dem Plot eliminieren und den Sedimenttransport durch Splash entlang der Plotgrenzen nicht berücksichtigen.

Fazit:

Trotz dieser Einschränkungen sind Plotstudien geeignet, um die das Erosionsgeschehen steuernden Prozesse zu verstehen. Insofern sind die Ergebnisse von Plotstudien aufschlussreich und sollen im Kontext der genannten Einschränkungen, insbesondere zur Validierung von Modellergebnissen, berücksichtigt werden.

2. Befliegung mit Feldaufnahmen (BRAZIER 2004)

Ein methodischer Ansatz bietet sich in der Befliegung von Transekten und der anschließenden Auswertung der Aufnahmen hinsichtlich Dimension und Intensität der Erosion. Nach BRAZIER (2004) stellen solche Aufnahmen jedoch eine Verzerrung der tatsächlichen Erosion dar, da dadurch hauptsächlich nur die Rillen- und Grabenerosion, nicht aber schwächere Erosionsformen erfasst werden.

3. ^{137}Cs – Methode (NOUIRA et al. 2003; QUINE 1995, 1999**)**

Die ^{137}Cs – Methode liefert die Bodenabtragsrate für einen längeren Zeitraum und erfasst die Summe aller Erosionsprozesse, so auch diejenigen, die bei den anderen Erhebungsmethoden nicht erfasst werden. Vor- und Nachteile ergeben sich durch:

- Anreicherung von 137Cs –in Böden aus Nuklearwaffentest in den Jahren 1950 bis 1970
- Höhere Affinität für Ton, daher eine relativ homogene Verteilung innerhalb von kleinen Einzugsgebieten und Flächeneinheiten.
- Vergleich von 137Cs von Ackerflächen mit benachbarten ungestörten Grünlandflächen oder Referenzprofilen

4. Feldaufnahme (BRAZIER 2004; MORGAN 1985) */ Kartierung* (MOSIMANN 2009)

Feldaufnahmen umfassen die volumetrische Messung von Rillen oder anderen Erosionserscheinungen, welche dann in Bodenabtrag pro Einheitsfläche unter Einbeziehung der Trockenraumdichte umgerechnet werden. In Niedersachsen wird das Erosionsgeschehen beispielsweise im Rahmen einer Dauerbeobachtung in drei Modellregionen durch Kartierung und Vermessung der Erosionsformen auf Basis des DVWK – Merkblattes 239 (1998) erfasst (MOSIMANN et al. 2009).

<u>II. Indirekte Methoden:</u>

1. Sedimentationsmessungen in Talsperren / Wasserreservoiren (ROWAN et al. 1995)
Mittels der Sedimentationsmessung in Talsperren und Wasserreservoiren kann die langfristige Geschichte der durchschnittlichen Sedimentanlieferung quantifiziert werden (ROWAN et al. 1995). Nicht erfasst wird damit die (vorübergehende oder längerfristige) Sedimentspeicherung im System bzw. dem/den Einzugsgebieten. Unbedingt berücksichtigt werden muss dabei auch die Effizienz des Sedimentrückhalts im Reservoir. Es wird dabei angenommen, dass alle gemessenen Sedimente in Reservoir stammen aus Wassererosion des Einzugsgebietes stammen.

2. Suspensionsmessung
Einen ähnlichen Ansatz verfolgt die Suspensionsmessung in Oberflächengewässern. Die Suspensionsmessung dient vor allem zur Abschätzung von Off-Site-Schäden. Sie

liefert nur einen Teil der Gesamtsedimentmenge[11] aus dem Einzugsgebiet. Zeitreihen von Suspensionsmessungen geben keine akkurate Menge der Gesamtsedimentfracht eines Einzugsgebiets; solche Daten sind aber für die Erhebung des Abtrages der Feinteile (Nährstofftransport) wertvoll (BRAZIER 2004).

Bewertung

Ein Erosionsmonitoring auf die Basis von Sedimentfrachten in Gewässern zu gründen wird sowohl in dem von Boden-Dauerbeobachtung betroffenen Kreisen als auch unter Bodenschützern schon länger diskutiert (vgl. z.B. DÜWEL & UTERMANN 2003) und waren auch Gegenstand der Diskussion im Forum „Erosion, Verdichtung, Wasserhaushalt“ des 2009 durchgeführten BOKLIM-Workshops (UMWELTBUNDESAMT 2010).

Wenngleich diese Vorschläge ebenfalls in einigen technischen Berichten der Europäischen Umweltagentur aufgegriffen wurden (z.B. HUBER et al. 2003), wurden sie bislang nicht umgesetzt.

Abschätzungen der durch Bodenerosion eingetragenen Sedimente in Fließgewässer sind für unterschiedliche Nutzer relevant, z.B. die Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG). Das heißt diesbezügliche Daten liegen an unterschiedlichen Stellen ggf. schon vor, oder werden nicht zuletzt auch vor dem Hintergrund der zu erwartenden Klimaänderungen zukünftig vermehrt erhoben. Zu prüfen wäre daher, inwieweit in einem Geschäftsbereich-übergreifenden Ansatz entsprechende Synergien genutzt werden können. Denkbar wäre ein gestuftes Verfahren:

- Identifikation potenziell gefährdeter Gebiete als Ergebnis einer Modellierung potenzieller Erosionsgefährdung auf kleiner Maßstabsebene (bundesweit – Maßstab 1 : 1.000.000)
- Modellierung der landnutzungsabhängigen (aktuelle) Erosionsdisposition auf regionaler Maßstabsebene (z.B. 1 : 200.000)
- Definition geeigneter Einzugsgebiete (Größe, Landnutzung, ggf. Forschungsbedarf) und Zeitreihen

---

[11] DUCK & MCMANUS (1994): 54.4 %; LEWIN et al. (1974): nur 20 % des Sedimentsabtrags in der Suspension; NEWSON (1981): in Flüssen mit geringer Reliefenergie < 11 % der Sedimentabtrags in der Suspension

- Messung von Sedimentfrachten; parallel intensive Beobachtung des Erosionsgeschehens zur Ermittlung von Sediment-Liefer-Verhältnissen (Sediment delivery ratios (vgl. WISCHMEIER 1975, 1976; MITCHELL & UBENZER 1980)

Skalenproblem

Auf Grund der räumlichen und zeitlichen Dimension der Bodenerosion treten beim Vergleich zwischen Messungen auf Plotebene mit Messungen auf Einzugsgebiets-Ebene Probleme auf. Eine Extrapolation von Plot – Messungen auf Einzugsgebiet ist nicht zulässig (WALLING 1990, DE VENTE & POESEN 2005). Nach BOARDMAN (1998) sind Ergebnisse aus Plotexperimenten nicht für eine Regionalisierung geeignet. Auch unter sonst vergleichbaren Bedingungen wird sich der mittlere Bodenabtrag pro Flächeneinheit ändern, wenn sich die räumliche Skala ändert.

Die Ursachen dafür liegen u.a. darin, dass aufgrund der limitierten Hanglänge (auf der i.d.R. ein erosiver Oberflächenabfluss entstehen würde) auf kleinen Plots vor allem Splash-bedingte Auflösungs- und Transportprozesse dominieren. Weiterhin können auf kleinen Plots Gully-Erosion und Massenbewegung nicht simuliert werden, während diese aber auf größerer Skalenebene eine wichtige Rolle spielen können.

Die Ergebnisse von Plotmessungen müssen daher durch die Integration von Zeit und lokalen Oberflächenabflüssen, welche nicht die Erosionsrinnen erreichen, um das Sediment abzuliefern, skaliert werden (vom Plot abgetragenes Sediment muss nicht aus dem Einzugsgebiet oder der betreffenden Region ausgetragen sein).

Modelle

Hangmodelle wie WEPP, EUROSEM, EPIC und EROSION 2D benötigen Daten auf Hangebene, um Fehler abzuschätzen und die Modellgenauigkeit zu verbessern. Es ist nicht ausreichend Modelle, die für andere Regionen entwickelt wurden, zu übernehmen und die Ergebnisse als zuverlässig zu betrachten. Als Beispiel dazu soll die „Allgemeine Bodenabtragsgleichung“ als ein empirisches Modell angesehen werden, das durch die Daten, von denen es abgeleitet wurde, limitiert wird.

Plotergebnisse können für eine detaillierte Beschreibung von Wasser- und Sedimentflüssen bei einer höheren Auflösung für laufende Validation von Modellen und für das Verständnis der ablaufenden Prozesse verwerdet werden.

Für Modelle auf Einzugsgebietebene werden sowohl Abflussganglinien als auch Sedimentmessungen gebraucht, um den Output der Modelle, wie AGNPS, ANSWERS,

GAMES, MEDRUSH oder Erosion 3D zu überprüfen. Wegen des räumlichen Charakters dieser Modelle werden zusätzlich Daten aus verschiedenen Lagen innerhalb des Einzugsgebiets für die Evaluierung der Modellgenauigkeit gebraucht. Nach QUINE (1999) können hier ^{137}Cs-Werte als eine Möglichkeit zur Validierung vom räumlichen Verhalten von Modellen verwendet werden. In diesem Fall müssen andere Bodenumverteilungsprozesse, wie Verlagerung durch Bodenbearbeitung, bei der Modellierung explizit berücksichtigt werden.

Wenn Daten aus Sedimentationsmessungen zur Validierung von Erosionsmodellen genutzt werden sollen, müssen holistische Modellierungsansätze, welche alle Prozesse der Bodenerosion innerhalb eines solchen Einzugsgebietes berücksichtigen, verwendet werden. Es gibt bisher kaum Messdaten, die eine räumliche Validation (Verteilung auf der Fläche) von Erosionsmodellen auf Einzugsgebietsebene ermöglichen.

Modellierung liefert eine effiziente Methode zur Abschätzung von Bodenerosion auf einer vorgegebenen Skala. Weder eine Verbesserung der Modellgenauigkeit noch ein besseres Prozessverständnis solcher physikalisch basierten Modelle können ohne Rückgriff auf qualitativ hochwertige Monitoringdaten erreicht werden. Daher ist für die Validierung von Modellen auf Einzugsgebietsebene die Durchführung von Messungen auf verschiedenen Skalen innerhalb des betreffenden Einzugsgebiets notwendig.

<u>Fazit zu den direkten und indirekten Verfahren zum Monitoring der Bodenerosion</u>

1. *Abschätzung des Gefährdungsrisikos*: Das Gefährdungsrisiko kann durch Modellansätze aus Boden-, Nutzungs-, Relief- und Klimadaten abgeleitet werden.
   - Die Aussagen bleiben dabei bestenfalls qualitativ (gering – hoch)
   - Eine tatsächliche Erfolgskontrolle von Schutzmaßnahmen ist dabei nicht möglich. Die quantitative Erfassung der Bodenerosion ist nur entweder durch den Einsatz von regional validierten Modellen auf einer gegebenen Skala oder tatsächlich durch Monitoring möglich.
2. *Monitoring*

Im Falle von Bodenerosion ist auf Grund der räumlichen und zeitlichen Dimension der verursachenden Faktoren (vgl. Anlage 2.5) ein Monitoring im Sinne des klassischen Ansatzes (BDF, BZE usw.) nicht zu empfehlen. Bisherige Erfahrungen zeigen, dass

Ergebnisse von wenigen Messflächen (Plots, Einzugsgebiet, Suspensionsmessung, Sedimentationsmessung) nicht auf größere Regionen übertragen oder zur Regionalisierung verwendet werden können.

Trotzdem sind Messungen und ereignisbezogene Beobachtungen für die Validierung von Modellen, Risikoabschätzungsmethoden sowie für die Erfolgskontrolle von (Anpassungs-) Maßnahmen unerlässlich. Es gibt bisher kaum Messdaten, die eine räumliche Validation (Verteilung auf der Fläche) von Erosionsmodellen auf Einzugsgebietsebene ermöglichen. Vorhandene Messdaten stammen überwiegend aus Beregnungsversuchen oder einzelnen Monitoringplots, die zwar für eine Prozessstudie sehr geeignet sind, aber für eine umfassende Validierung und Verbesserung von Erosionsmodellen nicht ausreichen, da durch diese nur wenige Erosionsprozesse erfasst werden.

Empfehlung: Ansatz eines integrierten Monitorings

Empfohlen wird ein Monitoring von Erosion in ausgewählten Agrarregionen unter Berücksichtigung von Klima, Geomorphologie, Boden auf verschiedener Skalenebene von Plot bis Einzugsgebiet unter der Gewährleistung einer Mindestlaufzeit von 20 bis 30 Jahren. Daten können so für Prozessstudien, Validierung, Anpassung oder Neuentwicklung von Erosionsmodellen und Bewertungsmethoden auf Plot- (Einzelhang-) bzw. Einzugsgebietsebene sowie zur Beobachtung von Veränderungen von Erosionsgeschehen (durch Klima, Bewirtschaftung oder deren Wechselwirkung) genutzt werden. Als Schwerpunkt empfiehlt sich dabei die agrarische Landnutzung.

Das Verfahren soll wie folgt aufgebaut werden:

- Messung des Abtrages auf Einzugsgebietsebene
- Erfassung des Abtrages auf Schlag- (Plot-) Ebene auf ausgewählter Anzahl von Schlägen
- Periodische Messung über 137Cs über längere Zeiträume
- Gleichzeitige Erfassung von Landnutzung, Klima, Abfluss und anderen relevanten Daten
- s. oben: Sediment- bzw. Suspensionsmessungen

3.3.2 Bodenwasserhaushalt

J. Rinklebe; A. Prüß; C. Schilli

Vorbemerkung

Der Klimawandel wird auf den Wasserhaushalt von Deutschland auf vielfältige Art und Weise einwirken. So kommt es durch die zeitliche Verschiebung der Niederschläge im Jahresverlauf und dem geringeren Anteil von Schnee am Niederschlag beispielsweise zur Beeinflussung von Abflussmengen und Grundwasserständen. Die Wasserqualität der Flüsse und Bäche wird durch veränderte Wasserstände beeinträchtigt, was wiederum für die gesamte Lebewelt und die Trinkwassergewinnung relevant ist. Weiterhin zählen zu den Auswirkungen auf den Wasserhaushalt steigende Risiken für Extremereignisse wie Hochwässer, Sturmfluten oder Dürren (BMU 2009). Der Wasserhaushalt des Bodens wird vom Klimawandel betroffen. Die Bodenwasserbilanz wird sich durch die Umverteilung der Niederschläge (Erhöhung der Anzahl und Intensität von Starkniederschlägen, Verschiebung der Niederschläge innerhalb des Jahres vom Sommer in den Winter) und die höhere potentielle Evapotranspiration infolge des Temperaturanstieges verändern. Hier sind v.a. die Veränderungen der Bodenfeuchte und der Grundwasserneubildung zu nennen.

Klimaänderungen und Wirkungsprognose

Die Wirkungen des Klimawandels auf den Bodenwasserhaushalt sind vielfältig, komplex und werden sich regional und lokal differenziert auswirken. Klimabedingte Effekte auf den Bodenwasserhaushalt können nicht pauschal als positiv oder negativ beurteilt werden. Als Beispiel sei hier der Rückgang der Bodenfeuchte durch erwartete steigende Temperaturen und sinkende Niederschlagsmengen (z.B. im südlichen Hügelland) mit den Auswirkungen auf den Pflanzenbau genannt. Eine Abnahme der Bodenfeuchte von nass zu feucht ist für viele derzeit angebauten Kulturpflanzen positiv zu bewerten, da ein Wasserüberschuss (z.B. Stauwasser) das Wachstum beeinträchtigen kann. Eine Abnahme von feucht zu trocken hingegen bewirkt häufig Ertragseinbußen aufgrund von Trockenstress. Trends der maßgeblichen Einflussgrößen Temperatur und Niederschlag für Deutschland sind in Tabelle 1.1 ersichtlich. Für den Bodenwasserhaushalt

sind die klimatisch bedingten Änderungen der Evapotranspiration sowie die Umverteilung und Mengen der Niederschläge die entscheidenden Faktoren.

Der Klimawandel beeinflusst direkt und indirekt sowohl die Einträge von Wasser in den Boden (Menge des Niederschlages, kapillarer Aufstieg) als auch die Austräge aus dem Boden (Evapotranspiration, Sickerwassermenge). Neben der Menge beeinflusst auch die Umverteilung der Niederschläge die Wasserbilanz durch veränderte, zeitweise verstärkt auftretende Sickerwassermengen und damit die Grundwasserneubildung.

Beispielsweise wird durch die prognostizierte höhere potentielle Evapotranspiration (z.B. zentrales und südliches Ostdeutschland) und die Umverteilung der Niederschläge die Grundwasserneubildung in vielen Fällen abnehmen (FELDHAUS 2008). Dies gilt besonders für verschiedene Böden mit oberflächennahem Grundwasser (LFU 2007). Durch die Temperaturerhöhungen nimmt der Anteil an Schnee am Gesamtniederschlag ab. Die Menge von Sickerwässern zur Zeit der Schneeschmelze wird sich somit aufgrund der geringeren Schneemenge reduzieren. Dies bedeutet zeitgleich, dass in den Wintermonaten der nicht mehr als Schnee fallende Anteil an Niederschlag direkt im oder auf dem Boden abfließen oder im Boden gespeichert werden kann bzw. muss.

Grundwasser und Grundwasserneubildung

Modellierungen zum Bodenwasserhaushalt in Sachsen unter Berücksichtigung klimaregionaler Unterschiede, Eigenschaften von Bodenformen und standortbezogener Landnutzungen wurden mit Hilfe des Models ArcEGMO-PSCN vorgenommen (BRÄUNIG & KLÖCKNING 2008). Das Modell ist geeignet, um Einflüsse des globalen Klimawandels auf den regionalen Wasserkreislauf räumlich und zeitlich hochauflösend zu erfassen (BAH 2009). Die Modellierungsergebnisse zeigen, dass die Grundwasserneubildung von heute 150 mm/a auf voraussichtlich ca. 60 mm/a sinken wird. Dies wird zu einer Erhöhung der Anzahl der sehr trockenen Jahre führen. WURBS (2005) prognostiziert bezüglich des Wasserhaushalts von Einzugsgebieten im mittleren und südlichen Lössgebiet (Mitteldeutsches Trockengebiet, südliches Sachsen-Anhalt), dass sich die Grundwasserneubildungsrate im Vergleich der Zeiträume 1951-2000 und 2001-2050 verringern wird. MÜLLER & JÖRN (2007) haben mittels des komplexen Wasserhaushaltsmodells von J. & G. MÜLLER ebenfalls im Mitteldeutschen Trockengebiet im südlichen Sachsen-Anhalt die jährlichen Sickerwasserraten im Zeitraum 1901 bis 2000

untersucht. Sie ermittelten, dass die Sickerwasserrate von 56 mm im Zeitraum von 1901 bis 1950 auf 39 mm und im Zeitraum 1951 bis 2000 gesunken ist und bestätigen somit die Prognosen. Im Rahmen des GLOWA-Elbe-Projektes wurden in vergleichbaren Regionen sinkende Grundwasserstände vorausgesagt (SOMMER 2003).

In den östlichen Bundesländern wird in Zukunft von einem Rückgang der Grundwasserneubildung von 40 % ausgegangen (BMU 2008b). Ähnliches gilt für Feuchtgebiete des norddeutschen Tieflands, wie die Untersuchungen von LORENZ (2008) in der Spreewaldregion zeigen. Aufgrund der gesteigerten Evapotranspiration, die mit einem erhöhten Wasserverbrauch einhergeht, wird ein Rückgang der Grundwasserneubildung in der Spreewaldniederung gebietsbezogen um bis zu 54 % prognostiziert (LORENZ 2008). In einigen Regionen von Deutschland sind auch positive Auswirkungen auf Grundwasserneubildung prognostiziert. Für Regionen Hessens wird eine Zunahme der Grundwasserneubildung um 25 % bis 2050 im Vergleich zum Referenzzeitraum 1971 bis 2000 vorhergesagt. Auch verschiedene Untersuchungen in Süddeutschland kommen zu ähnlichen Ergebnissen. Die Grundwasserneubildung wird sich dort um ca. 10 – 20 % erhöhen (BMU 2008b).

Sinkende Grundwasserspiegel haben insbesondere für Böden mit aktuellem Grundwasserkontakt direkte Auswirkungen auf den Bodenwasserhaushalt. Das Absinken des Grundwassers kann zu fehlendem Wasserinput über das Grundwasser oder den offenen und geschlossenen Kapillarsaum führen. Steigende Grundwasserstände hingegen können Bereiche des Bodens über den kapillaren Aufstieg nun Wasser zuführen, die derzeit nur durch Niederschlag und / oder lateralen Zufluss Einträge von Wasser erhalten. Dies könnte u.a. flächenhaft küstennahe Bereiche betreffen, die durch einen eventuell steigenden Meeresspiegel einen entscheidenden Einfluss auf Bodenwassergehalte und Bodenfeuchte erfahren können.

Bodenwasser

Die zunehmenden Winterniederschläge führen in Regionen mit gut durchlässigen Böden zu einer erhöhten Grundwasserneubildung. Dies könnte in einigen Gebieten, trotz leicht verringerter Sommerniederschläge und einer erhöhten Verdunstung, zu einer im Jahresmittel erhöhten Grundwasserneubildung führen.

Tabelle 3.15 gibt einen Überblick über klimawandelbedingte Auswirkungen und mögliche Folgen für den Bodenwasserhaushalt.

BLUME & MÜLLER-THOMSEN (2007) haben in einem Feldexperiment an Küstenmarschböden den durch den Klimawandel bedingten erwarteten Temperaturanstieg simuliert. Dabei wurde die Temperatur des Oberbodens auf einer Fläche von 14 m² um 1,5 – 2,5 °C erhöht. Es konnten erhöhte Evapotranspirationsraten und eine stärkere zeitweise Austrocknung des Bodens festgestellt werden.

Steigender Wasserverbrauch durch höhere Temperaturen vor allem während der Wachstumsperioden sowie die Umverteilung der Niederschläge im Jahresverlauf führen zur Abnahme der nutzbaren Feldkapazität (nFK) und zu längeren Trockenperioden im Sommer. Dies ist vor allem für Böden mit bereits jetzt niedriger nutzbarer Feldkapazität (nFK) und geringem Wasserspeichervermögen vor allem aus landwirtschaftlicher Sicht als negativ zu bewerten. Sommer werden durch niedrigere Grundwasserstände und trockenere Böden gekennzeichnet sein (LFU 2007).

In leichten, nicht bewässerten Sandböden Brandenburgs konnten bereits Auswirkungen von Klimaveränderungen beobachtet werden; so wurde durch die sehr trockene und heiße Witterung von April bis August 2003 ein frühzeitiger Verbrauch der pflanzenverfügbaren Wasservorräte von Böden unter landwirtschaftlicher Nutzung festgestellt (CHMIELEWSKI 2007). Auf eine Reduzierung des pflanzenverfügbaren Wassers in Küstenmarschböden auf Grund von gestiegener Evapotranspiration weisen BLUME & MÜLLER-THOMSEN (2007) hin. MÜLLER & JÖRN (2007) zeigten für Flächen unter Grünlandnutzung, dass sich das Auftreten der minimalen nutzbaren Feldkapazität im Zeitraum von 1901 bis 2000 auf einen durchschnittlich späteren Termin im Jahr verschoben hat. Im Gegensatz zur ersten Hälfte des Jahrhunderts trat das Minimum im Mittel 17 Tage später, am 223. Tag des Jahres, auf.

SCHINDLER et al. (2007) haben den gegenwärtigen Stand und die weitere Entwicklung des Wasserhaushaltes und der Dürrerisiken von landwirtschaftlich genutzten Flächen in Nordost- und Mitteldeutschland im Hinblick auf den Klimawandel analysiert. Ihr Untersuchungsgebiet zeichnet sich durch geringe Niederschläge, Böden mit großer Heterogenität und großen Flächen von hydromorph geprägten Böden aus. Der Durchschnittsniederschlag hat zwischen 1951 und 2000 abgenommen und wird bis 2055

vermutlich weiter sinken. In Teilgebieten wird der Niederschlag jedoch auch lokal zunehmen. Die Bundesländer Brandenburg und Sachsen-Anhalt sind besonders von Bodenwasserdefiziten betroffen, was für einige landwirtschaftliche Kulturen problematisch ist. Im Durchschnitt dieser Jahre kann eine Austrocknung des Bodens das Pflanzenwachstum auf mehr als 40 % der landwirtschaftlich genutzten Gebiete beeinträchtigen. In den Bundesländern Mecklenburg-Vorpommern, Sachsen und Thüringen ist die Wasserversorgung der Pflanzen durch höhere Niederschläge bei entsprechender Wasserspeicherung jedoch meist ausreichend. Die klimatischen Veränderungen v.a. in zentralen und östlichen Gebieten Deutschlands führen zur Reduzierung des pflanzenverfügbaren Wassers in den meisten Böden (ZEBISCH et al. 2005). Die vermehrten Niederschläge werden hier meist in der Lage sein, gestiegene Evapotranspirationsverluste auszugleichen (MUNLV 2009).

Der reduzierte Wassergehalt der Böden wiederum bewirkt Rückkopplungseffekte. Die Bodenwasservorräte werden durch die Niederschlagsdefizite im Frühjahr zeitig aufgebraucht (JACOBEIT 2007). In Kombination mit steigenden Temperaturen ist die Folge eine erhöhte potentielle Evapotranspiration. Diese verstärkt die sommerlichen Trockenzeiten und zusätzlich Temperaturextreme, da die Verdunstungsabkühlung reduziert ist (FISCHER et al. 2007). In Nordrhein-Westfalen wird zukünftig mit für den Pflanzenbau meist günstigeren nFK gerechnet.

Tab. 3.15: Klimawandelbedingte Auswirkungen und Folgen für den Bodenwasserhaushalt

Klimaänderung	Auswirkung	Folge
Temperaturanstieg	Erhöhung der potentiellen Evapotranspiration	Abnahme des Bodenwassergehaltes durch erhöhten Bodenwasserentzug durch Pflanzen Abnahme des Bodenwassergehaltes durch Verdunstung Absenkung des Grundwasserspiegels bei Kontakt zum Boden über kapillaren Aufstieg
	Reduzierung der Sickerwassermenge durch verstärkten Rückhalt der Niederschläge in den trockeneren Böden	Abnahme der Grundwasserneubildung
	Sinkende Grundwasserspiegel durch geringere Grundwasserneubildung und erhöhte Wasserzehrung	Abnahme des kapillaren Aufstiegs
	Abnahme des kapillaren Aufstieg	Abnahme des Bodenwassergehaltes

Klimaänderung	Auswirkung	Folge
Erhöhung der Niederschlags-mengen (im Winter)	Erhöhte Wassereinträge durch Niederschlag	Erhöhung des Bodenwasser-gehaltes
	Erhöhung der Sickerwassermenge	Erhöhung der Grundwasser-neubildung
	Steigende Grundwasserspiegel durch erhöhte Grundwasserneubildung	Zunahme des kapillaren Aufstiegs
	Erhöhter kapillarer Aufstieg bei steigendem Grundwasserspiegel	Erhöhung des Bodenwasser-gehaltes
Vermehrte Starkniederschläge bei gleichem Jahres-niederschlag	Zeitweise erhöhter Oberflächenab-fluss	Wasser kann nicht im Boden gespeichert werden
	Zeitweise erhöhte Sickerwassermen-gen	Zeitweise erhöhte Grundwasser-neubildung
	Erhöhung des Anteils von nicht speicherbarem Niederschlagswasser durch verstärkten Oberflächenabfluss und erhöhte Sickerwasserraten	Reduzierung des Bodenwasser-gehaltes
Geringere Mengen an Schnee-niederschlägen	Sonst als Schnee auf dem Boden gespeichertes Wasser kann in den Boden eindringen	Erhöhung des Bodenwasser-gehaltes Erhöhung der Sickerwassermen-ge und der Grundwasserneubil-dung
	Reduzierte Wassereinträge im Frühjahr durch reduzierte / fehlende Mengen an Schmelzwasser	Reduzierung des Bodenwasser-gehaltes
	Veränderte Wasserspeicherung in und auf Böden	Erhöhung des Bodenwasser-gehaltes im Winter Erhöhte Grundwasserneubildung im Winter Frühere Austrocknung der Böden im Frühjahr / Sommer
Geringere Niederschläge im Sommer	Reduzierte Wassereinträge durch Niederschlag	Reduzierung des Bodenwassergehaltes
	Reduzierte Sickerwassermenge	Reduzierung der Grundwasserneubildung
	Sinkende Grundwasserspiegel durch geringere Grundwasserneubildung	Abnahme des kapillaren Aufstiegs
	Abnahme der kapillaren Aufstieg bei sinkendem Grundwasserspiegel	Reduzierung des Bodenwasser-gehaltes

<u>Auswirkungen auf den Boden und seine Funktionen</u>

Steigende Meeresspiegel werden die Ausbreitung der semiterrestrischen und semi-subhydrischen Böden in den Küstenbereichen in Richtung Inland vorantreiben. Diese Böden werden durch das eindringende Salzwasser verstärkt der Gefahr der Versalzung unterliegen. Die durch Evaporation verringerte Menge an pflanzenverfügbarem

Wasser ging in Küstengebieten mit höheren Salzkonzentration in der Bodenlösung einher (BLUME & MÜLLER-THOMSEN 2007) und kann eine Versalzung der dortigen Böden unterstützen. Diese relative Salzanreicherung ist auch für einige küstenfernere Böden zu erwarten, die abnehmende Bodenfeuchten aufgrund von steigender Evapotranspiration bis in den trockenen Bereich erwarten. Insbesondere sind von einer Versalzung Böden mit Grundwasserkontakt und kapillarem Aufstieg bis in den Oberboden sowie stark bewässerte Böden gefährdet.

Die Änderung der Grundwasserverhältnisse können an verschiedenen Standorten Einfluss auf die Ausprägung des Bodentyps und die zukünftige Pedogenese nehmen. Das verstärkte Trockenfallen grund- und stauwasserbeeinflusster Böden sowie ein Absinken des Grundwasserspiegels (FELDHAUS 2008) hingegen werden lokal zu einem Rückgang der semiterrestrischen Böden führen. So werden beispielsweise Go- und Gr-Horizonte von Gleyen nicht mit den entsprechenden Wassermengen ausgestattet sein und ihre charakteristischen Merkmale langfristig verlieren. Diese Standorte werden mit der Zeit terrestrische Böden ausbilden. Ein Absinken der Grundwasserstände hat für Moore und andere Feuchtgebiete besondere Bedeutung. Es kommt zum Rückgang solcher meist erhaltenswerter und unter Naturschutz stehender Biotopflächen. In solchen Böden kann sich die Mineralisation drastisch erhöhen (siehe Kap. 3.3.4) und damit den Stoffaustrag (siehe Kap. 3.3.3) und die Vegetation beeinflussen (KAMP et al. 2008, WECHSUNG et al., 2004). Wenig bewachsene Böden unterliegen durch die Austrocknung einer erhöhten Erosionsgefahr (siehe Kap. 3.3.1). Bei Starkniederschlägen kann das Niederschlagswasser nach Wassersättigung des Bodens verstärkt oberflächig in Vorfluter abfließen. Das an der Oberfläche abfließende Wasser geht für die Grundwasserneubildung verloren, fördert die Erosion und greift somit in den Stoffhaushalt von Böden und Vorflutern ein.

Die Wasserspeicherfunktion von Böden wird durch verschiedene Eigenschaften des Bodens beeinflusst. Wichtige beeinflussende Größen sind beispielsweise die Bodenart, der Anteil an organischer Substanz, die Benetzbarkeit der Bodenmatrix sowie das Porenvolumen und die -größe. Auf verschiedene dieser Größen hat der Klimawandel Auswirkungen. Durch die verstärkte Austrocknung vor allem von tonig-lehmigen Böden können sich gerade im Sommer größere und tiefere Trockenrisse bilden. Die folgenden Niederschläge können somit über diese Fließwege die oberen Bodenhorizonte umge-

hen und verstärken somit eine Reduzierung des pflanzenverfügbaren Wassers im Oberboden. Prognostizierte längere Trockenphasen führen vor allem bei organischem Bodenmaterial zu hydrophoben Effekten. Die Wasserspeicherkapazität von Humusauflagen sowie Moorböden wird kurzfristig erheblich gesenkt. Mit dem häufigen Auftreten von Trockenperioden im Sommer kommt es zur verstärkten (ggf. zeitweiligen) Austrocknung der Feuchtgebiete und Moore, die in ihrer Fähigkeit beeinträchtigt werden, Starkregenereignisse abzupuffern (BMU 2008a). MARKART et al. 2004 bestätigen eine Erhöhung des Oberflächenabflusses auf Rasenflächen und durch ausgetrocknete Humusauflagen in Wäldern. Das zeitliche Auftreten sowie die veränderten Mengen an Sickerwasser sind entscheidend für verschiedene Umlagerungs- und Transportprozesse im Boden. Dies ist vor allem für Stoffverlagerung von Bedeutung (siehe Kap. 3.3.3).

Das Pflanzen- und Wurzelwachstum wird ebenfalls stark vom Wassergehalt des Bodens gesteuert (DOBBERTIN & GIUGGIOLA 2006) und kann deutlich reduziert werden, wenn der Boden im Sommer zeitweise austrocknet (MISSON et al. 2006). Die regional geringeren Jahresniederschläge sowie die veränderte Verteilung der Niederschläge im Jahresverlauf mit hoher sommerlicher Evapotranspiration wird für den jetzigen Pflanzenbestand nicht selten zum zeitweise Wassermangel führen und die Wachstumsbedingungen verschlechtern (LFU 2007). Eine Folge könnte der Wechsel zu einer für diese Standorte günstigere Pflanzen- und Tiergesellschaft sein. Die Auswirkungen des Klimawandels auf das Pflanzenwachstum sind regional stark unterschiedlich und werden zusätzlich von der Flächennutzung abhängig sein. Im Norden, v.a. im Nordosten kommt es in sandigen Böden mit ihrem geringen Wasserrückhaltevermögen vermehrt zu Trockenstress für Pflanzen (ZEBISCH et al. 2005).Im Raum Chemnitz ist trotz der klimatischen Auswirkungen auf den Bodenwasserhaushalt mit einer durchschnittlich ausreichenden Wasserversorgung der Vegetation auf tiefgründigen Lössböden zu rechnen (BRÄUNIG & KLÖCKNING 2008). In Nordrhein-Westfalen wird damit gerechnet, dass sich aufgrund der steigenden Temperaturen und der im Jahresmittel meist günstigeren Bodenwasserverhältnisse bessere Standortbedingungen auf landwirtschaftlichen Nutzflächen ergeben. Eine leichte Ertragssteigerung für die regional typischen Nutzpflanzen wurde prognostiziert (MUNLV 2009). In Brandenburg hingegen konnten bereits Ertragseinbußen festgestellt werden (CHMIELEWSKI 2007).

Neben den landwirtschaftlichen sind auch die forstwirtschaftlichen Flächen betroffen. Die Zusammensetzung der Nadelwälder wird im Vergleich zu den besser angepassten Mischwäldern besonders durch den Klimawandel beeinflusst werden. Fichtenbestände werden am stärksten betroffen sein. Die Fichte ist nur wenig trockenheits- und hitzetolerant und bevorzugt daher eher feuchte, kühle Standorte, die aufgrund der beschriebenen Auswirkungen des Klimawandels zurückgehen werden. Des Weiteren sind auch die Standorte der Buche bedroht, welche ebenfalls feuchtere Standorte bevorzugt. Innerhalb von Deutschland sind daher Gebiete besonders gefährdet, in denen die Bodenwasserverfügbarkeit schon heute gering ist (Teile Ostdeutschlands), in denen der erwartete Temperaturanstieg besonders stark ausfallen wird (Südwestdeutschland) oder in denen die Fichte nicht unter natürlichen Standortbedingungen vorkommt (Süd- und Westdeutschland). Die Küstengebiete (rel. geringe Klimaänderung, geringe Gefahr von Trockenstress), das Voralpenland und große Teile der Mittelgebirge sind weniger von diesen Auswirkungen betroffen.

Die stärkere Durchfeuchtung der Böden im Winter durch die Verschiebung der Niederschläge sowie des Fallen der Niederschläge als Regen anstatt von Schnee, hat Auswirkungen auf Nutzungsfunktion der Böden. Besonders flachwurzelnde Bäume werden auf Grund geringerer Verankerungsstabilität in den feuchten Böden verstärkt anfälliger gegenüber Windwurf. Des Weiteren wird die winterliche Holzernte forstwirtschaftlich genutzter Flächen durch die schlechtere Befahrbarkeit der Böden beeinflusst (LBEG 2009). Die hohen aus den Winterniederschlägen resultierenden Wassergehalte im Frühjahr wirken sich negativ auf die Gefügestabilität der Böden aus. Dies gilt auch für die sinkenden Phasen des Auftauens und Gefrierens. Hier ergeben sich Auswirkungen auf die Möglichkeiten der Frühjahrsbodenbearbeitung (LBEG 2009). Der winterliche Abfluss durch höhere Niederschläge wird sich erhöhen, da die anfallenden Wassermengen nicht im Boden, oder als Schnee auf dem Boden gespeichert werden können. Dies führt zu einer erhöhten Gefahr von winterlichen Hochwasserereignissen.

<u>Fazit:</u>

Der Klimawandel, insbesondere die erhöhte potentielle Evapotranspiration und die veränderte Niederschlagssituation, werden flächenhaft den Bodenwasserhaushalt und den Grundwasserspiegel beeinflussen. Durch sinkende Grundwasserspiegel kann die

Ausprägung von semiterrestrischen Böden zurückgehen. Verschiedene Standorte werden aufgrund der oftmals trockeneren Bedingungen keine geeigneten Standorte mehr für die bestehende Biozönose und/oder Landnutzung sein. Hiervon sind vor allem schützenswerte Landschaften wie beispielsweise Moore, Auenökosysteme und andere Feuchtgebiete betroffen. Verschiebungen in der Zusammensetzung von Fauna und Flora sind zu erwarten. An ausreichend feuchten Standorten können aufgrund erhöhter Temperaturen jedoch auch günstigere Standorteigenschaften im Hinblick auf eine landwirtschaftliche Nutzung erwartet werden. Die Nutzungsfunktion wird zusätzlich durch veränderte optimale Zeitpunkte der Befahrbarkeit von Böden beeinträchtigt. Oberflächliche Abflüsse werden verstärkt auftreten und die Erosion fördern. Sickerwässer werden in ihrer Quantität bei Starkniederschlagereignissen verstärkt, sodass insgesamt im Jahresverlauf bei gleicher Gesamtniederschlagsmenge weniger Wasser im Boden gespeichert werden kann. Die Funktion als Wasserspeicher wird zudem durch die zeitweise Austrocknung der Böden sowie den abnehmenden Schneeniederschlag beeinflusst. Der veränderte Bodenwasserhaushalt hat durch Stofftransporte mit dem Sickerwasser und dem Einfluss auf die biologische Aktivität Auswirkungen auf den Stoffhaushalt. Steigende Meeresspiegel schieben die Grenze von marin geprägten Böden und der Versalzung weiter ins Inland.

Projekte und Forschungsvorhaben

In Deutschland befassen sich zahlreiche laufende oder abgeschlossene Projekte und Forschungsvorhaben mit den Auswirkungen des Klimawandels auf den Bodenwasserhaushalt (siehe Tab. 3.16).

Zur Untersuchung des Bodenwasserhaushaltes werden in Berlin derzeit mehrere Projekte im Rahmen der BMBF-Fördermaßnahme KLIMZUG (Klimawandel in Regionen zukünftig gestalten) beantragt (BU-/LABO 2009). Dabei sollen u.a. folgende Untersuchungen durchgeführt werden:

- Wassermanagement im Ballungsraum Berlin unter sich wandelnden Klimabedingungen,
- Integration klimainduzierter Wasserverfügbarkeitskonflikte in regionale Planungs- und Entwicklungsprozesse,
- stadthydrologische Anpassungskonzepte.

In dem BMBF-Verbundprojekt „Strategische Anpassungsansätze zum Klimawandel in der Modellregion Hamburg“ (KLIMZUG Nord) sollen vor dem Hintergrund der Klimaänderungen im Rahmen des Projektes die möglichen Auswirkungen auf das Grundwasserdargebot in der Metropolregion Hamburg regional differenziert analysiert werden (BU-/LABO 2009).

Zurzeit wird vom Forschungsinstitut für Bergbaufolgelandschaften (FIB) e.V. ein Projekt zur Wirkung des Klimawandels auf die Wuchsdynamik vorherrschender Baumarten der Lausitzer Bergbaufolgelandschaften unter Berücksichtigung des Bodenwasserhaushaltes durchgeführt (BU-/LABO 2009).

In Sachsen wird von mehreren Forschungseinrichtungen, Landesfachbehörden und Universitäten ein bodenkundlich-hydrogeologisches Modell aufgebaut (BU-/LABO 2009). Dabei werden die Auswirkungen des Klimawandels auf den Bodenwasserhaushalt, Stoffflüsse und Stoffumsatz, Landnutzung und Gewässerökologie untersucht sowie das Modell in das Feldversuchswesen zur Entwicklung anwendungsorientierter Anpassungsstrategien eingebunden. Außerdem wurde in Sachsen 2004 das **KliStWa**-Forschungsprojekt (Einfluss regionalisierter **Kl**imaprognosen und **St**offhaushaltssimulationen (dynamische Modellierung) auf den Stoffhaushalt repräsentativer Standorts- und **Wa**ldbestandstypen in Sachsen) durchgeführt (BU-/LABO 2009).

Modellierungen zum Bodenwasserhaushalt in Sachsen unter Berücksichtigung klimaregionaler Unterschiede, Eigenschaften von Bodenformen und standortbezogener Landnutzungen wurden mit Hilfe des Models ArcEGMO-PSCN vorgenommen (BRÄUNIG & KLÖCKNING 2008). Das Modell ist geeignet, um Einflüsse des globalen Klimawandels auf den regionalen Wasserkreislauf räumlich und zeitlich hochauflösend zu erfassen (BAH 2009).

Tab. 3.16: Aktuelle Beispiele für Projekte und Forschungsvorhaben für Untersuchungen der klimabedingten Veränderungen des Bodenwasserhaushaltes

Name des Projektes / Forschungsvorhabens	Laufzeit	Projektförderer/ durchgeführt von bzw. in	untersuchte Größen/Prozesse
Verschiedene Projekte im Rahmen KLIMZUG – Klimawandel in Regionen zukunftsfähig gestalten. z.B. KLIMZUG Nord – Strategische Anpassungsansätze zum Klimawandel in der Modelregion Hamburg INKA BB – Innovationsnetzwerk Klimaanpassung Region Brandenburg Berlin	k.A.	BMBF	Verschiedene Parameter des Wasserhaushaltes Grundwasserdargebot Wassermanagement und Wasserverfügbarkeit
KliWEP – Abschätzung der Auswirkungen der für Sachsen prognostizierten Klimaveränderungen auf den Wasser- und Stoffhaushalt im Einzugsgebiet der Parthe	2004 – 2010	Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie	Boden- und Grundwasser
Wirkung des Klimawandels auf die Wuchsdynamik vorherrschender Baumarten der Lausitzer Bergbaufolgelandschaften unter Berücksichtigung des Bodenwasserhaushaltes	k.A.	Forschungsinstitut für Bergbaufolgelandschaften (FIB) e.V.	Bodenwasserhaushalt
TERENO – Terrestrial Enviromental Observatoria	2008 – min. 2023	Helmholzstiftung	Bodenwasserhaushalt
Projekt KlimLand RP – Klima- und Landschaftswandel in Rheinland-Pfalz	2008 – 2011	Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft Rheinland-Pfalz (FAWF) mit Einbeziehung des Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK)	Bodenwasserhaushalt
Entwicklung eines bodenkundlich-hydrogeologischen Modells	k.A.	Universität Halle, Helmholz-Zentrum für Umweltforschung, verschiedene Landesfachbehörden	Bodenwasserhaushalt

Vom Sächsischen Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie wird von 2004 bis 2010 das Forschungsprojekt **KliWEP** (Abschätzung der Auswirkungen der für Sachsen prognostizierten **Kli**maveränderungen auf den **W**asser- und Stoffhaushalt im **E**inzugsgebiet der **P**arthe) durchgeführt (SMUL 2009). Zu den Projektzielen gehört die Untersuchung der grundlegenden Auswirkungen des Klimawandels auf die Einzugsgebiete des Mitteldeutschen Tieflands unter Berücksichtigung der sich in der Sanierung befindlichen ehemaligen Bergbaugebiete (Prognosen für die Mengen- / Beschaffenheitsentwicklung von Oberflächen-, Boden- und Grundwasser). Weiterhin sollen Empfehlungen für regionalspezifische Bewirtschaftungsmaßnahmen zur Anpassung von Wasser-, Forst- und Landwirtschaft erarbeitet werden. Dabei soll ein Wasserhaushalts- und Stoffflussmodel entwickelt werden.

Modellierungen zum Bodenwasserhaushalt

Wasserhaushaltsmodelle sind wichtige Instrumente für wasserwirtschaftliche Fragestellungen, die zur Abschätzung der Auswirkungen von Klimaänderungen eingesetzt werden können. Sie sind geeignet, um auf der Basis von Klimaszenarien Änderungen des Wasserhaushaltes zu prognostizieren und daraus Handlungsstrategien abzuleiten (AK KLIWA 2000). „In Wasserhaushaltsmodellen werden die relevanten hydro(meteoro)logischen Prozesse wie Niederschlag, aktuelle Verdunstung, Bodenwasserspeicherung, Schneedeckenspeicherung, Grundwasserneubildung sowie die flächen- und gerinnebezogenen Wassertransporte in ihren gegenseitigen Wechselwirkungen mit physikalisch basierten Modellkonzepten beschrieben.“ (AK KLIWA 2009). Bezüglich des Bodenwasserhaushaltes existiert eine Vielzahl von Modellsystemen, von denen hier eine Auswahl dargestellt wird (Tab. 3.17).

Das Kooperationsvorhaben KLIWA („Klimaveränderungen und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft“) beschäftigt sich u.a. mit der Modellierung des Wasserhaushaltes. Im Projektbereich B „Abschätzung der Auswirkungen möglicher Klimaveränderungen auf den Wasserhaushalt erfolgen Simulationsrechnungen mit Wasserhaushaltsmodellen. Die Wasserhaushaltsmodelle werden für die einzelnen Flussgebiete schrittweise implementiert.

Tab. 3.17: Beispiele für Modellierungen zum Bodenwasserhaushalt

Modellbezeichnung	Kurzbeschreibung
LARSIM – Large Area Runoff Simulation Model	Wasserhaushaltsmodell, Simulation der Wasserbilanz von Flusseinzugsgebieten
ASGi – Kontinuierlicher Abfluss und Stofftransport – Integrierte Modellierung unter Nutzung von Geoinformationssystemen	Wasserhaushaltsmodell, Simulation der Wasserbilanz von Flusseinzugsgebieten
ArcEGMO-PSCN	Hydrologisches Modellierungssystem für Flusseinzugsgebiete, Wasserhaushaltsmodellierungen
SIMWASER	Wasserhaushalts- und Ertragsmodell
STOTRASIM	Bspw. Ermittlung der H_2O- , N- und C-Dynamik in Ackerböden

Vom Bundesland Baden-Württemberg wurde das in Wasserhaushaltsmodell LARSIM (Large Area Runoff Simulation Modell) konzipiert. In Bayern wird das Wasserhaushaltsmodell ASGi (Kontinuierlicher Abfluss und Stofftransport – Integrierte Modellierung unter Nutzung von Geoinformationssystemen) eingesetzt. Beide Modelle bestehen aus mehreren Modulen, die konzeptionelle Parallelen aufweisen und teilweise vergleichbare Teilprozessbeschreibungen verwenden. Beide Modelle wurden in den Jahren 1987-96 im Flussgebiet der Tauber kalibriert und verifiziert (AK KLIWA 2009). Das Modell LARSIM wird zur kontinuierlichen Simulation der Wasserbilanz in Einzugsgebieten unterschiedlicher Größenordnung zwischen 10 km² und 1 Mio. km² mit unterschiedlichen klimatischen Bedingungen eingesetzt. Das Modell ermöglicht eine prozess- und flächendetaillierte Simulation des terrestrischen Wasserkreislaufs in hoher zeitlicher Auflösung (LUCE et al. 2006).

ArcEGMO-PSCN[12] ist ein hydrologisches Modellierungssystem zur räumlich und zeitlich hoch aufgelösten Modellierung von Einzugsgebieten unterschiedlicher Größe, welches geeignet ist, Untersuchungen von Einflüssen des globalen Wandels auf den regionalen Wasserkreislauf (Klima- und Landnutzungsänderungen) vorzunehmen (BAH 2009).

[12] EGMO – Abflussbildungsmodul – Abflussbildung auf grundwasserfernen und -nahen Flächen unter Berücksichtigung der Interzeption, der Infiltration und Muldenspeicherung und des Bodenwasserhaushalts; PSCN- Abflussbildungsmodul, welches neben der Wasserdynamik im System Vegetation-Boden auch den Kohlenstoff- und Stickstoffhaushalt simuliert (BAH 2009)

Ein weiteres Beispielmodell ist das Wasserhaushalts- und Ertragsmodell SIMWASER[13]. Mit SIMWASER werden die Zusammenhänge zwischen dem Bodenwasserhaushalt und dem Pflanzenwachstum einschließlich der zugrundeliegenden Abhängigkeiten von Klima-, Pflanzen- und Bodenfaktoren mathematisch beschrieben und miteinander verknüpft (STENITZER 2000).

Das Modell STOTRASIM ermittelt die Wasser- und Stickstoffdynamik im Bodenprofil eines Ackerstandortes in vertikaler Richtung (FEICHTINGER 2008). Das Modell SIMWASER ist integraler Bestandteil von STOTRASIM und berechnet dabei die Wasserflüsse und die Vegetationsentwicklung.

Neben der Simulation des Bodenwasserhaushaltes sollte bei Modellierungen eine möglicherweise auftretende Nutzungskonkurrenz um das vorhandene Wasser berücksichtigt werden. Die Berücksichtigung einer solchen Steuergröße richtet sich nach dem Untersuchungsraum und dem Wasserangebot und ist bei der Berechnung des Wasserhaushaltes im Einzelfall zu entscheiden.

Datenbedarf, Datenangebot und Dateneignung

Die beschrieben Projekte und Forschungsvorhaben zeigen, dass es möglich ist, Auswirkungen des Klimawandels anhand von Bodendaten zu erkennen. Um bundesweite Aussagen treffen zu können, muss geprüft werden welche Daten vorhanden sind und inwiefern sie zu solchen Auswertungen verwendet werden können. Anhand des Datenangebotes und der Eignung vorliegender Daten können jene Daten identifiziert werden, welche für aussagekräftige Analysen verwendet werden können oder zusätzlich notwendig sind.

Neben verschiedenen Bodenparametern sind zur Beurteilung der Bodendaten im Bezug auf den Klimawandel klimatologische, biologische und hydrologische Parameter notwendig, die (teilweise einfach) an Bodenmessstellen erhoben werden (können). Dies sind die bereits genannten relevanten Parameter, die direkt auf den Bodenwasserhaushalt Einfluss nehmen, wie z.B. Niederschlag, Sickerwasserrate, Evapotranspiration, Grundwasserstand und Vegetation.

---

[13] SIMWASER model as a tool for the assessment of soil water balance

Für die Untersuchung der Folgewirkungen des Klimawandels auf den Bodenwasserhaushalt ist es zunächst notwendig, verschiedene Bodenparameter zu messen. Dies sind vor allem Parameter, die das Wasserspeichervermögen beeinflussen (z.B. Bodenart, Humusgehalt). Direkte Auskunft über die Wasserverhältnisse im Boden geben z.B. die Bodenfeuchte und -wassergehalt als messbare oder die nutzbare Feldkapazität als berechneter Parameter.

Für eingehende langfristige klimatologische Auswirkungen auf den Bodenwasserhaushalt sollten die folgenden Parameter gemessen werden:

Standortbeschreibung:	▪ Klimaparameter (Lufttemperatur, Niederschlag, Sonneneinstrahlung) ▪ Vegetation (Art, Nutzung) ▪ Geomorphologie (Hangneigung, Exposition) ▪ Bodenform
Dynamische Kennwerte der Standorte:	▪ Grundwasserflurabstand ▪ Sickerwasserrate ▪ Lateraler Zufluss ▪ Evapotranspiration ▪ Versickerung ▪ Oberflächenabfluss
Allgemeine horizontbezogene, bodenkundliche Kenngrößen:	▪ Bodenart ▪ k_f-Wert / k_u-Wert ▪ Porenvolumen ▪ Lagerungsdichte ▪ Bodengefüge
Dynamische horizontbezogene, bodenkundliche Kenngrößen:	▪ Bodenwassergehalt ▪ Wasserspannung ▪ Redoxpotential ▪ Bodentemperatur

Die Untersuchungen der Boden-Dauerbeobachtung (Basis- und Intensiv-BDF) liefern eine Vielzahl an Informationen zur Messung von Bodenveränderungen. Neben klimatologischen Parametern werden im Rahmen der Untersuchungen der Basis-BDF be-

stimmte obligate bodenphysikalische Parameter ermittelt. Diese Parameter können eine wichtige Grundlage darstellen, allerdings erfolgt dies im Rahmen der Standortbeschreibung oft nur einmalig (siehe Tabelle 3.18).

Tab. 3.18: Derzeit zu messende obligate und empfohlene (kursiv) Parameter auf BDF-Standorten (nach BARTH et al. 2001)

Parameter	**Untersuchungshäufigkeit**
Basis-BDF	
Korngrößen (Schluff, Sand, Ton; z.T. gS, mS, fS, ffS, gU, mU, fU)	einmalig
Rohdichte, trocken	einmalig
Festsubstanzdichte	einmalig
Porengrößenverteilung	einmalig
Wasserleitfähigkeit kf	einmalig
Wasserleitfähigkeit ku	*einmalig*
Ungesättigte Wasserleitfähigkeit	*einmalig*
Bodenwassergehalt (volumetrisch)	*≤ 1 Woche*
Bodensaugspannung	*≤ 1 Tag*
Redoxpotenzial	*> 5 Jahre*
Intensiv-BDF (zusätzliche Klimadaten zu Basis-BDF)	
Niederschlagsmenge	Auflösung: ≤ 0,2 mm und ≤ 1 Stunde
Niederschlagsintensität	Auflösung: ≤ 0,2 mm und ≤ 1 Stunde
Interzeption	möglichst hohe Auflösung
Sickerwasserrate , Grundwasserneubildung	möglichst hohe Auflösung
Globalstrahlung	möglichst hohe Auflösung
Lufttemperatur	möglichst hohe Auflösung
Rel. Luftfeuchte	möglichst hohe Auflösung
Wind	möglichst hohe Auflösung

Die Evapotranspiration wird aus den letzten vier Parametern von Tabelle 3.18 berechnet. Die Sickerwassermenge wird meist nicht direkt gemessen sondern rechnerisch ermittelt. Mit knapp 800 aufgenommenen Böden und umfangreichem Parameterspektrum (siehe BARTH et al. 2000) bietet das Boden-Dauerbeobachtungsprogramm eine wertvolle Datensammlung (vgl. Kap. 3.1.1).

Mit den Klimadaten der Intensiv-BDF sowie den dort erhobenen Bodentemperaturen und Daten zum Wasserhaushalt stellen diese Flächen einen wertvollen Datenpool der Bodenklimaforschung im Hinblick auf den Bodenwasserhaushalt dar.

Daten aus einzelnen Programmen wie ICP Forest Level II, verschiedenen landwirtschaftlichen Dauerfeldversuchen mit wiederholter Aufnahme von Parametern mit Relevanz für den Bodenwasserhaushalt sowie Ergebnisse der Feldlysimeter-Untersuchungen können zur Auswertung klimarelevanter Fragestellungen herangezogen werden. Aus dem Programm des ICP Forest können Daten der Level II-Flächen genutzt werden. Die Parameterlisten dieser Flächen umfassen alle notwendigen Kriterien zur Erfassung der Bodenwasserbilanz. Zusätzlich können weitere an diesen Standorten erhobene Daten (z.B. Phänologie, Bodenvegetation) ergänzende Informationen zur Interpretation liefern. Landwirtschaftliche Dauerfeldversuche sowie Lysimeterversuche beinhalten im Untersuchungsprogramm teilweise ebenfalls Messungen von Bodenwasserhaushaltsparametern und können auf in Einzelfällen sehr lange Zeitreihen (bis in die 1930er Jahre) zurückgreifen (vgl. Kap. 3.1.1).

Die Daten, die an den Messstationen der Projekte ICP Forest Level I, BZE I und II, Umweltprobenbank (Probenart Boden) sowie Bodenschätzung ermittelt werden, sind nur bedingt zur Untersuchung der Veränderungen des Bodenwasserhaushaltes durch den Klimawandel geeignet. Oft wird nur eine einmalige Erhebung durchgeführt oder eine flächenhafte, bundesweite Abdeckung der Messstationen ist nicht ausreichend, da sich einige Bundesländer in Deutschland nicht an allen Projekten beteiligen. Daten aus Programmen mit bereits durchgeführter einmaliger Erhebung können eine Grundlage für zukünftige Auswertungen bieten. Bereits eingerichtete Flächen sollten beim Aufbau eines Messnetzes für Fragen des Klimawandels berücksichtigt werden. Des Weiteren befassen sich verschiedene Projekte (laufend z.B. GLOWA-Elbe oder in der Startphase z.B. TERENO) mit dem Klimawandel und den Auswirkungen auf und Rückkopplungen vom Boden. Hier bestehen / entstehen verwendbare Datensammlungen.

Mit dem ICP Forest Level I-Programm werden an über 6.000 Wald-Messstationen in Europa Aussagen über die Boden-Wasserverfügbarkeit getroffen und dazu eine Einteilung in drei Klassen (unzureichend, ausreichend, verfügbar für die meisten Arten) vorgenommen.

Im FutMon-Projekt, welches Messstationen aus dem ICP Forest Level I-Programm heranzieht, werden Kenngrößen zum Bodenwasserhaushalt (inklusive Bodenmatrixpotential und Bodenfeuchte) ermittelt.

Fazit zu Eignung, Aussagekraft und räumlicher Verteilung:

Die im Rahmen der Basis-BDF erfassten obligaten Parameter sind auf Grund des Erhebungsintervalls zur Zeit nur unzureichend geeignet, um die stark dynamischen und fluktuierenden Veränderungen des Bodenwasserhaushaltes zeitnah und adäquat zu erfassen. Die zur Beschreibung des Bodenwasserhaushaltes wichtigen Größen, wie z.B. Wassergehalt, Wasserspannung in verschiedenen Tiefen und die Infiltrationsrate werden nicht erfasst. Der Grundwasserstand wird nur vereinzelt gemessen. Die obligaten Daten der Basis-BDF sind somit nicht ausreichend um eine klimabedingte Änderung des Wasserhaushaltes flächenhaft und repräsentativ zu bewerten.

Mit den vier Programmen (Intensiv-BDF, Level II-Flächen, Landwirtschaftliche Dauerfeldversuche und Feldlysimeter-Dauerversuche) stehen bundesweit etwa 270 Standorte zur Verfügung, an denen Parameter zum Bodenwasserhaushalt in unterschiedlicher Dauer und Umfang erhoben werden.

- Die höher auflösenden Daten der Intensiv-BDF ermöglichen bei langjährigem Monitoring von den Wasserhaushalt beeinflussenden Daten sinnvolle Auswertungen zu Änderungen des Bodenwasserhaushalts auf Grund des Klimawandels. Sie stellen damit einen wertvollen Datenpool der Bodenklimaforschung im Hinblick auf den Bodenwasserhaushalt dar.
- Level II-Flächen bieten eine vergleichbar gute Aussagekraft der Daten. Die Parameterlisten dieser Flächen umfassen alle notwendigen Kriterien zur Erfassung der Bodenwasserbilanz. Umfangreiche Informationen zu Parametern des Bodenwasserhaushaltes können den Feldlysimeter-Dauerversuchen entnommen werden, an denen wägbare Lysimeter installiert sind. Einzelne langjährige Messreihen, die

häufig viele Bodenwasserhaushaltsparameter erfassen (wie beispielsweise einzelne Lysimeteranlagen) ermöglichen zwar räumlich begrenzte, dafür aber umfangreiche Auswertungsmöglichkeiten. Die langjährigen Dauerfeldversuche bieten Daten verschiedener Auflösung und Zeitreihenlänge für Auswertungen zum Klimawandel und können als Ergänzungen der angesprochenen Datensätze verwendet werden.

- Die Feldlysimeter-Dauerversuche und Intensiv-BDF verteilen sich mehr oder weniger einheitlich über das gesamte Bundesgebiet. Schwerpunkte der Verteilung der Intensiv-BDF liegen in Bayern, Niedersachsen und Rheinland-Pfalz, die mit zusammen 56 Intensiv-BDF über die Hälfte der Standorte stellen. Level II-Untersuchungsflächen sind im Nordwesten Deutschlands unterrepräsentiert.
- Die landwirtschaftlichen Dauerfeldversuche weisen eine geringere Flächenrepräsentanz auf, zumal viele Standorte eher räumlich eng nebeneinander liegen; deren Ergebnisse sind somit schwerer flächenhaft übertragbar.

Zur Untersuchung der Veränderungen des Bodenwasserhaushaltes durch den Klimawandel nur bedingt geeignet sind die Daten, die an den Messstationen der Projekte ICP Forest Level I, BZE I und II, Umweltprobenbank (Probenart Boden) sowie im Rahmen der Bodenschätzung ermittelt werden, da oft nur eine einmalige Erhebung durchgeführt wird oder die Abdeckung der Messstationen für flächenhafte bundesweite Aussagen nicht ausreichend ist.

Inwieweit mit den vorhandenen Daten bereits repräsentative flächenhafte Aussagen für das Bundesgebiet getroffen werden können, ist derzeit nur schwer abschätzbar. Hierzu müsste eine Zuordnung der verschiedenen Flächen zu fragestellungsspezifischen repräsentativen Räumen erfolgen. Es muss geprüft werden, ob diese repräsentativen Räume in ausreichender Zahl mit den zu untersuchenden Parametern abgedeckt werden. Mit insgesamt 270 über das gesamte Bundesgebiet verteilten Standorten liegt ein Datenpool vor, der für die Beantwortung verschiedener klimabezogener Fragestellungen verwendet werden kann. Problematisch jedoch ist die Vielzahl der verschiedenen Datensammlungen und Datenhalter.

Empfehlungen für künftige(s) Monitoring und Erhebungen

- Für zukünftige Auswertungen wäre es in einem ersten Schritt notwendig und sinnvoll, die Vielzahl der vorliegenden Daten zusammenzuführen.
- Eine Vernetzung der verschiedenen Messprogramme führt zur Vereinheitlichung der heterogenen Datenpools sowie zur Nutzung von Synergieeffekten aus wissenschaftlicher und wirtschaftlicher Sicht.
- Zuordnung der verschiedenen Flächen zu fragestellungsspezifischen repräsentativen Räumen. Es muss geprüft werden, ob diese repräsentativen Räume in ausreichender Zahl mit den zu untersuchenden Parametern abgedeckt werden.
- Die messtechnische Ausrüstung an Intensiv-BDF variiert in Abhängigkeit von der Einrichtung sowie der Fragestellung (z.B. im Rahmen von Projekten) oder auch zwischen den einzelnen Bundesländern. Langfristig und zeitlich hochauflösend sollten jedoch mindestens folgende bodenhydrologische Kenngrößen (sofern sie nicht schon erhoben werden) mit einheitlichen Methoden an allen Standorten gemessen werden:
  - Grundwasserflurabstand
  - Bodenwassergehalt
  - Matrixpotential
  - Redoxpotential (in hydromorph geprägten Böden)
  - Bodentemperatur
- Im Rahmen der BZE II soll eine näherungsweise Abschätzung der Wasserhaushaltssituation an den BZE-Standorten erfolgen: „Diese kann auf der Grundlage von einfachen, bereits bei der BZE I erhobenen bodenphysikalischen Merkmalen sowie mittlerweile vorliegenden modellierten Klimadaten und unter zusätzlichem Einsatz entsprechender Wasserhaushaltsmodelle vorgenommen werden.“ (BMELV 2007, S. 15). Eine Messung der oben genannten Parameter ist im Sinne einer flächendeckenden bundeseinheitlichen Bewertung sinnvoll.
- Wichtig ist eine Kopplung der Erhebung von Bodenfeuchtedaten mit anderen Fragestellungen, um Synergieeffekte zu nutzen. In Frage kommen hier beispielsweise Programme zu Empfehlungen der Befahrbarkeit von landwirtschaftlichen Nutzflächen.

- Zukünftige neue Messungen von Parametern des Bodenwasserhaushaltes sollten sich im Umfang und Intervall / Zeitpunkt mindestens an bestehenden Untersuchungsprogrammen orientieren, um eine Vergleichbarkeit der Daten zu ermöglichen. Dabei wäre beispielsweise an eine Ausrichtung auf die Messzeitpunkte assoziierter Niederschlagsmessungen zu denken. Eine tägliche Messung der eingangs empfohlenen Parameter ist sinnvoll. Wünschenswert sind jedoch häufigere tägliche Messungen. Die Zeitabschnitte sollten so gewählt werden, dass Tagesmittel sinnvoll zu berechnen sind. Bei der Messung durch fest installierte Geräte erfolgt die Erfassung zerstörungsfrei und ist daher beliebig häufig möglich.
- Verwendung der vorliegenden umfangreiche Datensammlungen, die im Vergleich zu den genannten vier Programmen meist nur kurze Zeiträume abdecken (z.B. BIOSOIL Demonstration Project), als Ergänzung und zur Ergebnisvalidierung der Auswertung langjähriger Zeitreihen. Solche Datensammlungen können bei ausreichend hoher Auflösung ebenfalls Informationen über klimabedingte, saisonale Verschiebungen geben. Dazu ist jedoch ein Vergleich mit entsprechend geeigneten Datensammlungen aus früheren Zeiträumen notwendig.
- Um die Folgen des Klimawandels abzuschätzen bzw. zu modellieren, ist eine Reihe von unterschiedlichen Daten räumlicher und vor allem zeitlicher Ausprägung erforderlich. Bei einer ersten Auswertung sollte im Wesentlichen mit den bereits erhoben und digital verfügbaren Daten gearbeitet werden (FELDHAUS 2008). Dabei können sowohl Flächen- als auch Punktdaten zum Einsatz kommen. Hierbei könnte festgestellt werden, ob die vorhandenen Daten in ausreichender Qualität und Quantität vorliegen. Gleichzeitig können auf diese Weise auch potentielle Schwächen des Datensatzes identifiziert und behoben werden.
- Bei Auswertungen zu Auswirkungen des Klimawandels sollten die 500 Messstellen des Deutschen Wetterdienstes (DWD) berücksichtigt werden, auch wenn anhand von Bodentemperatur und -feuchte allein kaum belastbare Aussagen zum Wasserhaushalt möglich sind. Regionale Monitoringprogramme der Bodenfeuchte können diesen Datenpool ergänzen. So werden beispielsweise in Nordrhein-Westfalen an sechs Standorten täglich Bodenfeuchte und -temperatur in verschiedenen Tiefenstufen gemessen.

3.3.3 Bodenstoffhaushalt, stoffliche Bodenbelastungen

J. Rinklebe; J. Utermann; A. Prüß; T. Frohne

Vorbemerkung

Der Bodenstoffhaushalt wird durch die Konzentration, die natürlichen und anthropogen beeinflussten Kreisläufe von Stoffen im Boden sowie ihr ökologisches Verhalten bestimmt. Dabei sind Nähr- und Schadstoffe von besonderer Bedeutung, welche sich durch unterschiedliches Verhalten im Boden auszeichnen. Grundsätzlich wird zwischen physikalisch-chemischen (z.B. Sorptionsvermögen und Verteilungskoeffizient) und biologischen Stoffeigenschaften (z.B. mikrobielle Abbaubarkeit) unterschieden.

Die klimawandelbedingten Veränderungen der Atmosphäre wirken sich ebenfalls auf den Bodenstoffhaushalt aus, da viele der stoffgebundenen Prozesse im Boden von der Temperatur und/oder vom Niederschlag beeinflusst werden. Zahlreiche Studien zeigen, dass extreme Wetterereignisse auch Bodenprozesse verändern können. Beispielsweise können Trockenheit oder extreme Kälte die bodenmikrobielle Aktivität und damit die Stoffumsatzleistungen und/oder die Mineralisierung empfindlich stören.

Auswirkungen des Klimawandels werden insbesondere auf folgende Bereiche des Bodenstoffhaushalts erwartet:

- Kohlenstoffhaushalt (organische Bodensubstanz),
- Stickstoff- und Phosphorhaushalt,
- anorganische und organische Schadstoffe sowie
- weitere Stoffe.

Klimaänderungen und Wirkungsprognose

<u>a) Organische Bodensubstanz</u>

Die organische Bodensubstanz (OBS) ist als die in und auf dem Mineralboden befindlichen abgestorbenen pflanzlichen und tierischen Stoffe und deren Umwandlungspro-

dukte definiert (BLUME et al. 2002). Auch anthropogen eingebrachte, z. T. synthetische organische Stoffe (z.B. Pestizide, organische Abfälle) zählen dazu.

Die OBS weist eine große Bedeutung für die Regulierung des globalen Kohlenstoffkreislaufs, für die Wasserspeicherung im Boden und für die Erhaltung der biologischen Vielfalt auf (EU 2008). Sie besitzt ein hohes Sorptionspotential für Nähr- und Schadstoffe (BVB 2000) und trägt zur Erhaltung der Bodenfruchtbarkeit bei.

Im Boden sind etwa 80 % der aktiv am Kohlenstoffkreislauf teilnehmenden terrestrischen organischen Kohlenstoffvorräte gebunden (BLUME et al. 2002). Somit sind in den Böden der Erde gegenwärtig insgesamt ca. 70 Mrd. t Kohlenstoff gespeichert (EU 2008).

Bei konstanten Umwelt- und Vegetationsbedingungen stellt sich im Boden nach ca. 75 Jahren ein sog. Fließgleichgewicht zwischen Anlieferung und Abbau der organischen Substanz ein, was durch einen charakteristischen Humusgehalt gekennzeichnet ist (KÖRSCHENS & SCHULZ 1999). Der Vorrat an organischem Kohlenstoff im Boden ist die Speicherung von C als Resultat von dessen Ein- und Austrägen. Diese Größen werden durch verschiedene Umweltfaktoren beeinflusst (siehe Abb. 3.5).

Unter gemäßigt-humiden Klimabedingungen, wie sie in Deutschland vorherrschen, weisen die Biomasseproduktion und der mikrobielle Abbau einen engen Zusammenhang auf (BLUME et al. 2002). Nur eine kleine Veränderung der Zersetzungsrate des abbauresistenteren Pools der C-Vorräte kann zu einer bedeutenden Veränderung des C-Vorrats im Boden über Jahrzehnte führen (DAVIDSON & JANSSENS 2006).

Vereinzelte Studien nennen steigende Temperaturen als einzige Ursache für erhöhte C-Umsätze. Oft jedoch beeinflussen Temperaturänderungen die mikrobielle Aktivität, und diese wiederum die C-Umsätze (Wechselwirkungen zwischen mikrobieller Aktivität und Temperatur, siehe Kap. 3.3.4).

Durch den Klimawandel und andere, teilweise anthropogen verursachte Einwirkungen verändern sich Gehalt, Menge, Zusammensetzung und Eigenschaften der OBS.

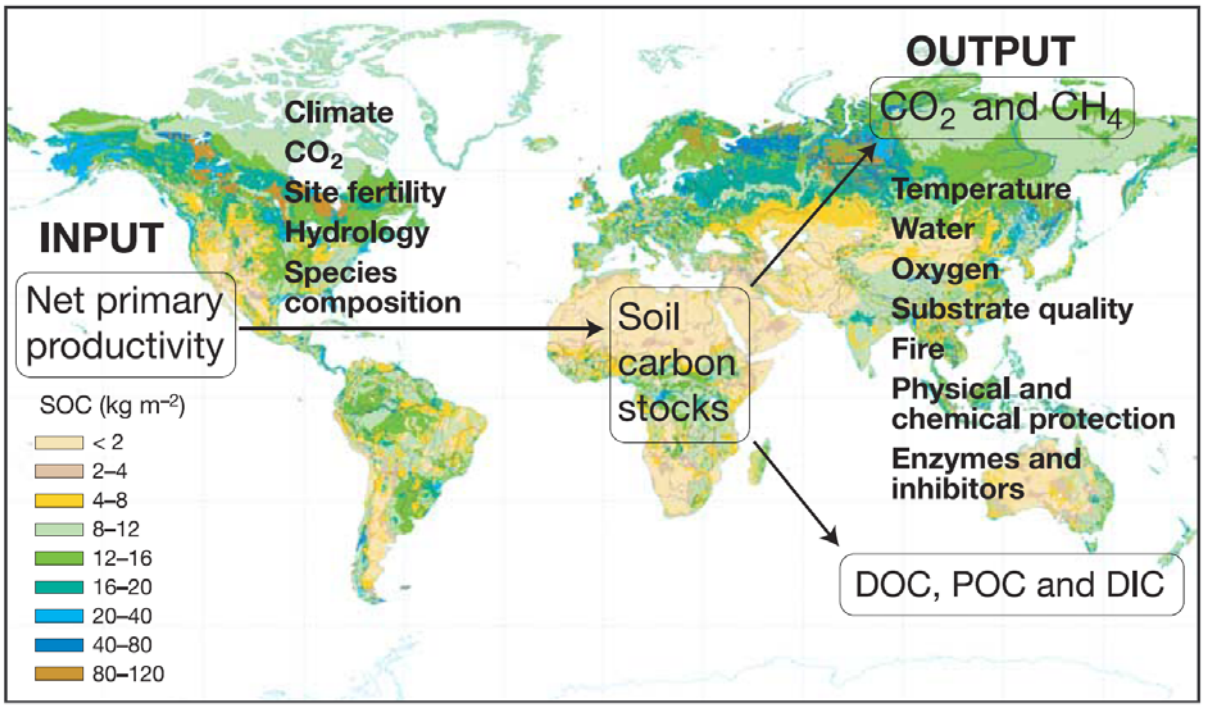


Abb. 3.5: Weltübersichtkarte der Vorräte an organischen Kohlenstoff im Boden sowie Einflussfaktoren der Haupteinträge und -austräge des Bodenkohlenstoffs

Kohlendioxid (CO_2) ist das Hauptprodukt der Zersetzung im Boden. Methan (CH_4), der gelöste organische Bodenkohlenstoff (DOC), der partikulär gebundene organische Kohlenstoff (POC) in Wasser und der gelöste anorganische Kohlenstoff sind ebenso wichtige **Austräge aus einigen Böden. Die Hintergrundkarte bildet den organischen Kohlenstoff (SOC) im Boden ab (nach Miller-Projektion; 1:100.000.000)**

Quelle: DAVIDSON & JANSSENS (2006)

Temperaturanstieg

Der durch den Klimawandel bewirkte Temperaturanstieg verstärkt in vielen Böden die mikrobielle Aktivität und damit den Humusabbau (siehe Kap. 3.3.4, KIRSCHBAUM 2006; DAVIDSON & JANSSENS 2006). Aufgrund der steigenden Temperaturen wäre somit generell flächenhaft ein verstärkter Abbau der OBS durch gestiegene mikrobielle Aktivität zu erwarten. Somit ist für viele Böden in den verschiedenen Regionen Deutschlands mit einer Abnahme der Kohlenstoffvorräte zu rechnen. Zahlreiche Studien zeigen, dass sich bei einer Temperaturerhöhung die Bodenatmungsraten erhöhen und somit dem Boden Kohlenstoff aufgrund höherer Zersetzungsraten verloren geht (EC 2008; DAVIDSON & JANSSENS 2006).

Die Auswirkungen werden in den Gebieten der höheren Breiten sowie der höheren Lagen der Mittel- und Hochgebirge stärker sein, da dort die aktuellen Abbauprozesse stärker durch die Temperatur begrenzt sind. Die temperaturbedingten höheren Abbauraten variieren zwischen 15 bis 45 % über eine Bandbreite von verschiedenen Lebensräumen (EC 2008).

Bei der Auswertung der Ergebnisse aus Dauerfeldversuchen in Deutschland hat ELLMER (2008) u.a. die längeren Zeitreihen des organischen Kohlenstoffs (C_{org}) am Beispiel des „Statischen Nährstoffmangelversuchs“ in Thyrow (südlich Berlin) betrachtet. Dabei stellte er eine Abnahme der C_{org}-Gehalte im Verlauf der letzten 40 Jahre um mehr als 10 % fest. ELLMER (2008) bringt das mit der Temperaturentwicklung in Zusammenhang, da im betrachteten Zeitraum die mittlere Lufttemperatur um 1,2 °C und die mittlere Bodentemperatur um 0,8 °C angestiegen sind. Die statistische Datenauswertung ergab einen engen Zusammenhang zwischen der Anzahl von Tagen mit Bodentemperaturen über 6 °C und der Entwicklung der C_{org}-Gehalte im Boden. Diese Ergebnisse weisen darauf hin, dass die Senkenfunktion des Sandbodens für Kohlenstoff auf dem Standort Thyrow in den vergangenen vier Jahrzehnten eingeschränkt wurde und zusätzlich bis zu 10 t ha^{-1} CO_2 in die Atmosphäre gelangt sind.

Der Temperaturanstieg kann andererseits auch die Bindung von Kohlenstoff aus der Atmosphäre im Boden fördern. Denn durch die erhöhten Temperaturen und die damit verbundene längere Vegetationsperiode bilden die Pflanzen bei ausreichendem Wasserangebot unter Verbrauch von CO_2 aus der Atmosphäre mehr Biomasse. Diese gelangt in den Boden und erhöht die Bodenkohlenstoffvorräte. Die Wälder in Deutschland sind aktuell eine Kohlenstoffsenke; gegenwärtig wächst mehr Holz als gerodet wird (ZEBISCH et al. 2005). In den deutschen Wäldern wurden zwischen 1987 und 2003 ca. 75 Mt CO_2 fixiert, was ca. 3 % der deutschen CO_2-Emmissionen für diesen Zeitraum entspricht (BMVEL 2005). Allerdings liegen erste Befunde vor, die bei ausgewachsenen Bäumen in natürlicher Umgebung auf eine CO_2-Sättigung hindeuten (KOERNER 2005). In einem Experiment mit künstlicher CO_2-Anreicherung nahmen die Bäume mehr CO_2 auf, welches allerdings nicht für deren Wachstum verwendet, sondern über die Atmung von Wurzeln wieder ausgeschieden wurde.

In der landwirtschaftlichen Pflanzenproduktion verursachen die verursachen die steigenden Temperaturen ein verstärktes Pflanzenwachstum, wodurch mehr organisches

Material in den Boden gelangt. Die Pflanzenproduktion kann das Ansteigen des C-Abbaus überschreiten, wodurch mehr Kohlenstoff im Boden zurückbleibt. Eine Quantifizierung dieser Rückkopplungseffekte erscheint aufgrund der Komplexität der Wirkungszusammenhänge derzeit unsicher. Die verschiedenen organischen Bestandteile im Boden weisen eine große Bandbreite von kinetischen Eigenschaften auf, welche die spezifische Temperaturempfindlichkeit für ihren Abbau bestimmen (DAVIDSON & JANSSENS 2006).

Steigende Temperaturen beeinflussen über die Evapotranspiration den Bodenwasserhaushalt (siehe Kap. 3.3.2). In bereits trockenen Gebieten könnte durch den Temperaturanstieg die Bodenfeuchte soweit gesenkt werden, dass negative Effekte auf die mikrobielle Aktivität zu erwarten sind (siehe Kap. 3.3.4, Abb. 3.8) und demzufolge mit einer reduzierten Umsetzung der OBS zu rechnen ist. In den Sommermonaten werden v.a. in Ostdeutschland die Niederschläge stark abnehmen. Gleichzeitig steigen die Temperaturen an, so dass dieser Effekt vermutlich besonders in dieser und in vergleichbaren Regionen und Gebieten auftreten wird.

Bodenwassergehalt/Bodenfeuchte

Die Auswirkungen der Änderung der Bodenfeuchte (siehe Kap. 3.3.2) und damit der mikrobiellen Aktivität (siehe Kap. 3.3.4) wurden bereits näher beschrieben. Aus den Ergebnissen ist abzuleiten, dass eine Änderung des Bodenwassergehaltes sowohl positive als auch negative Auswirkungen auf die mikrobielle Aktivität und den Abbau der OBS haben kann (siehe Kap. 3.3.4, Abb. 3.8). Eine Erhöhung der Bodenfeuchte wirkt zunächst fördernd auf den OBS-Abbau, hemmt diese aber nach Überschreiten eines Grenzwertes. Das bedeutet, dass sowohl eine zu geringe als auch eine zu hohe Bodenfeuchte den OBS-Abbau verlangsamt und somit einer mikrobiellen Reduzierung der C-Vorräte entgegensteht.

Eine stärkere Verringerung der Bodenfeuchte (beispielsweise länger andauernde Trockenphasen im Sommer) führt zu einer Hemmung der bodenmikrobiellen Aktivität und des OBS-Abbaus. Folgen davon sind eine Abnahme der CO_2-Freisetzung und die Zunahme der Bodenkohlenstoffvorräte. Ein Rückgang der Niederschläge und die dadurch länger andauernde Trockenheit führen außerdem zu einer Verarmung der Vegetation

und Streu, wodurch die Humusgehalte zurückgehen. Eine längere Trockenheitsphase durch Abnahme der Niederschläge führt zum Absinken des Grundwasserstandes und erniedrigt die Bodenfeuchte bei grundwasserbeeinflussten Böden. Bei stark wasserbeeinflussten Böden kann eine Senkung der Bodenfeuchte zu einer erhöhten mikrobiellen Aktivität und damit zu einer schnelleren Mineralisierung der gespeicherten OBS sowie einer erhöhten CO_2-Freisetzung führen. In Mooren kann das einen beschleunigten Torfabbau bewirken.

Erhöhte Niederschläge können über die dadurch bedingten anaeroben Verhältnisse hemmend auf den Abbau der OBS in einigen Böden wirken und die anregende Wirkung der Temperatur überdecken (BLUME et al. 2002). Anaerobe Verhältnisse können zeitweise (auch kleinskalig) während der Starkregenereignisse im Sommer oder über längere Zeit bei andauernden Niederschlägen oder während der Schneeschmelze / Tauereignissen auftreten. Besonders in Feucht- und Moorgebieten kann die klimagesteuerte Überflutung, z.B. bei Hochwasser, die Sauerstoffverfügbarkeit für Zersetzungsprozesse beeinflussen (DAVIDSON & JANSSENS 2006). Wenn der Wasserstand durch stärkere Niederschläge (z.B. im Winterhalbjahr) oder durch Schneeschmelze im Frühjahr ansteigt (z.B. in Mooren, Anmooren sowie teilweise in Auenböden und Marschen), ist häufig eine Humusanreicherung zu verzeichnen, da Sauerstoffmangel den Streuabbau, insbesondere den Abbau des Lignins hemmt (Hemmung der Mineralisationsleistung) (BLUME et al. 2002).

Wechsel von Trocken-Nass-Zyklen sowie von Gefrieren und Tauen

Bedingt durch den Klimawandel wird die Häufigkeit und Intensität der Wechsel von Trocken-Nass-Zyklen zunehmen, wodurch der C-Umsatz beeinflusst wird. Häufiges Trocknen und Durchnässen führt zu einer Verringerung der Zersetzung des organischen Materials (BORKEN & MATZNER 2009). Häufig reicht der Wassergehalt in nässeren Phasen nicht aus, um die geringeren Mineralisierungsraten während der Trockenphasen auszugleichen. Die Mineralisationsleistung in solchen Phasen ist besonders von der Intensität und der Dauer der Trockenphasen, der Menge und der Verteilung der Niederschläge, der Temperatur sowie der Hydrophobie abhängig. Während bei längeren Sommertrockenzeiten die Mineralisation und die C- und N-Flüsse sich verrin-

gern, erhöht sich die Abnahme von C und N aus Böden durch ansteigende Niederschläge in sonst trockeneren Regionen (BORKEN & MATZNER 2009).

Extreme Wetterereignisse werden in Deutschland zunehmen. Dazu zählen intensive Frost- und häufigere Tauperioden im Winter, die C- und N-Ströme im Boden beeinflussen können (SCHMITT et al. 2008). In einer Laborstudie wurden die Wirkung der Frostintensität und wiederholter Frost-Tau-Phasen auf die Qualität und Quantität der organischen Bodensubstanz untersucht (SCHMITT et al. 2008). Die Mengen von Mikroben- und Pflanzenzucker verringern sich mit zunehmender Frostintensität. Als Erklärung für diese Verringerung während der Frostphasen werden chemische Veränderungen der Zuckermoleküle bis hin zur Stabilisierung der OBS angeführt. Das bedeutet, dass mit verringerten Frosttagen im Winter die OBS schneller abgebaut wird und somit der C-Vorrat verringert wird.

GAUL et al. (2008) fanden an einem ausgewachsenen Fichtenbestand im südöstlichen Deutschland, dass Feinwurzeln während Frostzeiten verstärkt absterben und somit Kohlenstoff in den Boden gelangt. Die klimabedingte Abnahme der Bodenfrosttage kann dazu führen, dass das Absterben von Feinwurzeln und somit die C-Zufuhr in den Boden abnimmt.

Der Klimawandel führt zum Abtauen von Permafrostböden in Teilen der Alpenregion. Die dort fixierten Kohlenstoffvorräte können dann freigesetzt werden und am Stoffkreislauf teilnehmen. Dies ist wegen der aktuell gefrorenen Böden nicht möglich (DAVIDSON & JANSSENS 2006).

Abbauresistenz

Die Kinetik-Theorie impliziert, dass die Temperaturempfindlichkeit des Abbaus der OBS mit der Abbauresistenz ansteigen sollte. KIRSCHBAUM (2006) weist darauf hin, dass neben der Temperatursensibilität des Abbaus der OBS die Menge und Qualität der organischen Substrate besonders bedeutsam ist. Die Menge und die Qualität des verfügbaren organischen Materials beeinflusst entscheidend die Zersetzungsaktivität. Beispielsweise kann schon ein kleiner Anteil des labilen Pools der OBS im Frühjahr verwertet werden, so dass zur Zeit der optimalen Zersetzungsbedingungen mehr

schwerer zersetzbares Material vorhanden ist und daher die Zersetzungsrate geringer ist.

Weitere Einflüsse des Klimawandels auf die OBS

Neben den genannten klimabedingten Veränderungen der Zersetzung des bodenbürtigen C werden von DAVIDSON & JANSSENS (2006) zusätzliche klimabedingte Ursachen angeführt:

- Durch den Einfluss von Regentropfen werden die Aggregate zerstört. Regionen mit vermehrt auftretenden Starkregenereignissen sind besonders betroffen.
- Temperatur und Bodenfeuchte beeinflussen die chemischen Adsorptionsprozesse der OBS an den Mineraloberflächen. Die klimagesteuerte hydrologische Balance unter Drainage, Niederschlag und Evapotranspiration bestimmt die Mächtigkeit des Wasserfilms, welcher die Diffusion der löslichen organischen C-Substrate beeinflusst.

Fazit:

Durch steigende Temperaturen wird der Abbau der OBS bei ausreichender Bodenfeuchte zunehmen. Verstärkte Trockenheit hingegen kann zu einer Verminderung des Abbaus der OBS sowie einem vermindertem Aufbau an Biomasse (Pflanzenmaterial) führen.

Andererseits kann die Pflanzenproduktion bei klimatisch bedingten günstigeren Standorteigenschaften ansteigen und damit auch verstärkt organisches Material dem Boden zuführen. Steigende Bodenwassergehalte können bei Überschreiten eines kritischen Wertes den Abbau der OBS hemmen, was zur C-Anreicherung führen kann. Dies wäre z.B. in küstennahen Gebieten durch einen Anstieg des Meeresspiegels zu vermuten.

Absinkende Grundwasserspiegel können in Mooren und Auengebieten dazu führen, dass dort gespeicherte C-Vorräte durch verstärkte aerobe Zonen umgesetzt werden können. Die C-Vorräte können dann aktiv am Kohlenstoffkreislauf teilnehmen.

Tabelle 3.19 gibt eine Übersicht über mögliche Auswirkungen des Klimawandels auf den Stoffhaushalt in Böden.

Tab. 3.19: Mögliche Auswirkungen des Klimawandels auf den Stoffhaushalt in Böden – gegliedert nach Bodenkompartimenten

Boden-kompartiment	**Klimaänderung**	**Auswirkungen**
Organische Bodensubstanz (OBS)	Temperaturanstieg	*Quellenfunktion:* Zunahme der mikrobiellen Aktivität → Erhöhung der Bodenatmung und damit der CO_2-Freisetzung → Erhöhung des Abbaus der OBS → Verringerung der Bodenkohlenstoffvorräte *Senkenfunktion:* → Erhöhung der Pflanzenproduktion → erhöhte CO_2-Bindung durch die Pflanze und dann im Boden → Erhöhung der Bodenkohlenstoffvorräte
	längere Vegetationsperiode	s. Temperaturanstieg
	Abnahme der Bodenfeuchte	Abnahme der mikrobiellen Aktivität → Reduzierung des OBS-Abbaus → Abnahme der CO_2-Freisetzung → Zunahme der Bodenkohlenstoffvorräte
	Erhöhung der Niederschläge	anaerobe Verhältnisse, höhere Grundwasserstände → Hemmung des Abbaus der OBS → Humusanreicherung → Torfbildung (z.B. in Mooren, Anmooren, teilweise in Auenböden oder Marschen)
	Abnahme der Niederschläge / längere andauernde Trockenheit	Verarmung an Phytomasse / Änderung der Artenzusammensetzung / Verschiebung der Areale von Pflanzengesellschaften Humusgehalte sinken
	Zunahme des Wechsels von Trocken-Nass/Gefrier-Tau-Zyklen	Einfluss auf den C- und N-Umsatz Abtauen von Permafrostgebieten → verstärkte Verfügbarkeit von OBS Einfluss auf die Mineralisierung je nach Dauer und Intensität der Trockenzeiten Auswirkung auf Qualität und Quantität der OBS
	Abnahme der Bodenfrosttage	weniger Feinwurzeln sterben ab → weniger organisches Material in den Boden

Boden-kompartiment	Klimaänderung	Auswirkungen
N- und P-Haushalt	Temperaturanstieg	→ Beschleunigung der Nitrifikation → bei gut durchlässigen Böden verstärkte Nitratauswaschung und Bodenversauerung → Abnahme der N-Vorräte im Boden
	Zunahme der Niederschläge / Zunahme der Starkregenereignisse → Bodenerosion	Zunahme des oberirdischen P- und N-Austrag Zunahme des P- und N-Transports vom Boden in das Grundwasser → erhöhte Umsetzung der OBS – Freisetzung von mobilen N und P → geringere Adsorption an Bodenteilchen, da Übersättigung im Oberboden
	Zunahme Temperatur, Verdunstung und Niederschlag	Zunahme der P- und N-Mineralisation Zunahme der P-und N-Auswaschung ins Grundwasser Zunahme der Denitrifikation
	Grundwasserabsenkung in Niedermooren durch verringerte Sommerniederschläge	Mineralisierung des torfgebundenen N → Nitratausträge in Grundwasser
Schadstoffe	Temperaturanstieg	Abbau der OBS → geringeres Bindungsvermögen der OBS für Schadstoffe → Freisetzung und Verlagerung von Schadstoffen
	Zunahme von Starkregenereignissen	durch Zunahme der Sickerwassermenge Verlagerung von Schadstoffen in das Grundwasser
	Zunahme von Temperatur und Niederschlag	Zunahme der Ausgasung von organischen und anorganischen Schadstoffen aus dem Boden
	Zunahme der Bodenvernässung durch höhere Niederschläge	reduzierende Bedingungen → Rückgang von pedogenen Oxiden- bzw. Hydroxiden / verstärkte Freisetzung von Fe^{2+} und gelöster org. Substanz / verstärkte Mobilisierung von Schadstoffen → Austrag aus dem Boden in Grund-, Drainage- und Oberflächenwässer
Weitere Prozesse	durch Temperaturanstieg verbundene Austrocknung der Böden	höhere Schrumpfungsvorgänge in tonig-lehmigen Böden → Rissbildung → Tiefreichende Bildung von Fe und Mn -oxiden und -hydroxiden in zuvor hydromorph geprägten Böden → Erhöhung des Redoximorphismus → höhere Salzkonzentration
	Zunahme der Niederschläge	→ Einfluss auf pedogenetische Verlagerungsprozesse (z.B. Podsolierung)

b) Stickstoff- und Phosphor-Haushalt

Stickstoff (N) und Phosphor (P) sind Nährstoffe, die sich durch sehr unterschiedliche Bindungsformen in Böden auszeichnen. Je nach Bindungsform können N und P im Boden verbleiben, ausgewaschen oder von Pflanzen aufgenommen werden. In hohen Konzentrationen können N und P als stoffliche Belastungen für Luft, Wasser, Boden oder Pflanzen wirken. Phosphor gelangt hauptsächlich über Düngung in den Boden, wird im Laufe der Zeit in den Kreislauf der organischen Substanz eingebunden und verbleibt dann zum Großteil im Humus (STAHR et al. 2008).

In den Böden des gemäßigt-humiden Klimas kommt Stickstoff hauptsächlich in organischer Bindungsform vor. In kleinen Anteilen ist er in Form von Ammonium (NH_4^+) oder Nitrat (NO_3^-) im Boden zu finden.

Temperaturanstieg

KOLB & REHFUESS (1997) gehen davon aus, dass bei Böden unter Wald ein Temperaturanstieg unter vergleichbaren Bedingungen zu einer Abnahme der N-Vorräte bis zur Einstellung eines neuen Gleichgewichts führt. In einem Experiment wurden dazu in den Alpen verschiedene Bodensäulen in tiefer liegende Gebiete verlagert, um den Temperaturanstieg zu simulieren. Nach der Erwärmung von ca. 1 bzw. 2 °C wurde vermehrt Stickstoff überwiegend als Nitrat freigesetzt. Die Nitratauswaschung war im Sommer und z.T. auch im Winter beschleunigt. Das wichtigste Begleitkation von Nitrat war Al. Dieses Experiment zeigt, dass bereits eine geringe Erhöhung der mittleren Jahrestemperatur eine nennenswerte Beschleunigung der Nitrifikation verursacht. Damit kommt es bei Ausschluss der Vegetation auf durchlässigen Böden zu einer verstärkten Nitratauswaschung und zur Versauerung der Böden.

Zunahme der Niederschläge/Starkregenereignisse

Der P-Transport aus dem Boden erfolgt hauptsächlich über zwei Wege. Phosphor wird durch den Oberflächenabfluss, insbesondere der Bodenerosion durch Wasser (siehe Kap. 3.3.1), abtransportiert und durch die Wasserbewegungen im Boden verlagert (COX et al. 2005).

Oberflächenabfluss

Über den Oberflächenabfluss erfolgt der P-Transport in gelöster Form oder in Verbindung mit erodierten Teilchen (KRONVANG 1992). Starkregenereignisse, ein Hauptverursacher der Bodenerosion durch Wasser, werden durch den Klimawandel in ihrer Häufigkeit und Intensität zunehmen. P und N können in die Vorfluter gelangen und die Eutrophierung verstärken; dieser Prozess wird durch die Bodenerosion durch Wasser besonders gefördert (siehe Kap. 3.3.1). Dem P-Austrag über diesen Pfad wird deshalb eine größere Bedeutung zukommen.

Sickerwasser

Eine hohe P-Sättigung in Oberbodenhorizonten kann eine P-Verlagerung durch geringe Adsorption an die Bodenteilchen auslösen und dadurch zum Transport mit dem Sickerwasser in Richtung Grundwasser führen (BEHRENDT & BOEKHOLD 1993; ABRAMS & JARRELL 1995). Die P-Verlagerung im Boden findet unter heutigen Bedingungen eher in geringem Maße statt, jedoch wird die ökologische Bedeutung durch den Klimawandel vermutlich zunehmen. Bei Starkregenereignissen findet eine schnelle ungleichmäßige Wasserbewegung vorrangig durch Makroporen statt, die Einwirkzeit verringert sich und es kann vermehrt P aus der Bodenlösung der Oberbodenhorizonte ausgetragen werden (BEAUCHEMIN et al. 1998; LENNARTZ et al. 1999; DJODJIC et al. 2004). Die genannten Prozesse werden durch die vom Klimawandel bedingten Extremniederschlagereignisse sowie durch die erhöhte Umsetzung der OBS mit der verbundenen Freisetzung von mobilem N und P verstärkt. Die verstärkten Winterniederschläge, in der viele Böden nur eine geringe Vegetationsbedeckung aufweisen, können einen vermehrten P-Verlust aus dem Boden (ober- und unterirdisch) bewirken. Ein erhöhter P-Austrag ins Grundwasser ist daher als eine Folgewirkung des Klimawandels anzusehen.

Zunahme Temperatur, Verdunstung und Niederschlag

RINKER et al. (2008) untersuchten das Verhalten von N und P in Böden von Schleswig-Holstein im Zusammenhang mit steigenden Lufttemperaturen. Unter Verwendung des Modellsystems WASMOD erfolgten Berechnungen auf Grundlage von Daten der Agrarstatistik, des Deutschen Wetterdienstes, der REMO-Klimaprognosen sowie der Reichsbodenschätzung. Die Stickstoff- und Phosphorein- bzw. -austräge wurden für

Klimaszenarien nach dem regionalen REMO-Klimamodell modelliert. Bei Zunahme der Temperatur, Verdunstung und des Niederschlages wurde u.a. eine deutliche Zunahme der Sickerwasserrate, der P- und N-Mineralisation, der P- und N-Auswaschung sowie der Denitrifikation prognostiziert.

Inwieweit sich die Nitratkonzentration im Grundwasser durch Klimaveränderungen verändert, konnte beispielhaft in einer Studie (WPA 2003) anhand von Modellbetrachtungen in unterschiedlichen klimatischen Gebieten von Österreich gezeigt werden (KLAGHOFER & MURER 2004). In dieser Studie wurden für die Nitratverlagerung ins Grundwasser die Simulationsmodelle SIMWASER (STENITZER 2000) und STOTRASIM (FEICHTINGER 2008) angewendet. Mit diesen Modellen werden der Anteil und der Verlauf der Sickerwassermenge, die Nitratkonzentration im Sickerwasser sowie auch der Nitrataustrag berechnet. Für den Betrachtungszeitraum von 1975 bis 2000 wurden die folgenden Ergebnisse ermittelt: Für die Niederschläge und Temperaturen konnte für den größten Teil der Gebiete ein steigender Trend festgestellt werden. Die Niederschläge verschieben sich vom Sommer ins Frühjahr oder in den Herbst. Für zwei der Untersuchungsgebiete zeigen die Ergebnisse der Modellierungen einen deutlichen steigenden Trend der Sickerwassermenge und des Stickstoffaustrags. In einem anderen Gebiet steigt die Sickerwassermenge stärker als der Nitrataustrag (mit abnehmender Nitratkonzentration). Bei Böden, die durch ein geringes Nitrataustragsrisiko gekennzeichnet sind, wird der gegenteilige Effekt zu beobachten sein. In einem weiteren Untersuchungsgebiet wird die Nitratkonzentration im Sickerwasser abnehmen. Dort wird der Niederschlag in die Zeit des Pflanzenwachstums verlagert. Die Pflanzen nehmen vermehrt Stickstoff auf, wodurch weniger auswaschbares Nitrat im Boden vorhanden ist.

Grundwasserabsenkung in Niedermooren

Ein Beispiel für eine erhöhte Nitrat-Freisetzung bodenbürtiger N-Vorräte ist die u.a. klimabedingte Grundwasserabsenkung von Niedermooren, die u.a. durch verringerte Niederschläge in Sommermonaten verursacht werden kann. Sinkt das Grundwasser über längere Phasen unter die Torfdecke, so lässt mit zunehmender Belüftung die Denitrifikation stark nach. Es kommt zu einer starken Mineralisierung des torfgebunden Stickstoffs, wobei sehr hohe Nitratausträge ins Grundwasser verursacht werden (BVB 2000).

Fazit:

Die Sickerwasserraten werden voraussichtlich mit einer Zunahme der Niederschlagsintensität zunehmen. Mit oft steigender mikrobieller Aktivität aufgrund variierender Temperatur- und Wassergehaltsänderungen werden P und N verstärkt mineralisiert und können somit vermehrt aus dem Boden ausgewaschen werden. Aber auch der oberirdische P- und N-Austrag wird durch die Zunahme der Bodenerosion durch Wasser ansteigen.

c) Verhalten von Schadstoffen im Boden

Das Verhalten von Schadstoffen im Boden wird durch den Klimawandel beeinflusst. Organische und anorganische Schadstoffe gelangen aus verschiedenen anthropogenen und geogenen Quellen in festem, flüssigem oder gasförmigem Zustand in den Boden. Bedeutende, relativ gut untersuchte Bodenschadstoffe sind verschiedene Schwermetalle (z.B. Zn, Pb, Cd), As, PAK, PCB und PCDD/F.

Böden üben innerhalb der Ökosphäre natürliche Filter-, Puffer- und Transformationsfunktionen aus. Sie nehmen Schadstoffe auf, binden diese und entziehen sie somit – je nach Art der Schadstoffe und der Eigenschaften der Böden – in mehr oder weniger starkem Maß dem unmittelbaren Stoffkreislauf (BLUME et al. 2002).

Der Migrationsprozess dieser Stoffe im Boden wird generell von Transport-, Sorptions- und Transformationsvorgängen beeinflusst und ist abhängig von:

- den physikalisch-chemischen Eigenschaften des Systems Boden-Wasser,
- der mikrobiologischen Aktivität des Bodens und
- den Randbedingungen der Abflussbildung (Klotz 1999).

Schadstoffe in Böden werden vorrangig von der OBS, Tonmineralien und pedogenen Oxiden gebunden. Viele Schadstoffe werden besonders an die OBS gebunden und sind somit in ihrer Mobilität bzw. Mobilisierbarkeit abhängig von der Dynamik der OBS (LEWANDOWSKI et al. 1997). Weiterhin wird das Verhalten von Schadstoffen in Böden von der Aktivität der Mikroorganismen beeinflusst, die eine Transformatorfunktion

übernehmen (BLUME et al. 2002). Die Bodenreaktion ist ebenfalls ein bedeutsamer Faktor, da hierdurch die Mobilität von Stoffen (insbesondere von Schwermetallen) gesteuert wird. Mit abnehmendem pH-Wert nimmt die Mobilität vieler Stoffe zu. Für den Transport von Schadstoffen im Boden ist neben dem Sorptionsvermögen der Böden das Sickerwasser bedeutsam (BVB 2000) (siehe oben).

Temperaturanstieg

Die Bindung von anorganischen Schadstoffen an organische Substanzen wird stark über Huminstoffe gesteuert. Feste und gelöste organische Verbindungen können mit anorganischen Schadstoffen metall-organische Komplexe bilden. Das kann sowohl zu Mobilisierung als auch Immobilisierung von Schwermetallen und anderen Schadstoffen wie z.B. Arsen führen, je nachdem ob die Huminstoffe mobil oder immobil sind (LEWANDOWSKI et al. 1997; DULAING et al. 2009b).

Wird die OBS durch klimatische Veränderungen in Quantität und Qualität beeinflusst, so wirkt sich dies auf die hieran gebundenen Schadstoffe aus. Beispielsweise ist die Akkumulation von As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb und Zn von der OBS sowie der Bodenart abhängig (SCHRÖDER et al. 2005; VARSÁNYI & KOVÁCS 2006; YAMAZAKI et al. 2003; RINKLEBE et al. 2007a; DULAING et al. 2009a,b). Ein verstärkter Abbau der OBS durch erhöhte Temperaturen kann zur Freisetzung und Verlagerung zuvor festgelegter Schadstoffe führen und bewirkt zusätzlich ein geringeres Speichervermögen des Bodens für Schadstoffe.

Zunahme von Starkregenereignissen

Neben der OBS können auch pedogene Oxide (vorrangig amorphe Fe-Oxide und Hydroxide) Schadstoffe wie z.B. As binden (DU LAING et al. 2009a,b). Da sich durch den Klimawandel die Bodenwasserverhältnisse ändern, verändern sich auch die Mengen an pedogenen Oxiden. Bei Vernässung des Bodens, wie z.B. nach Starkregenereignissen, führen reduzierte Bedingungen zum Rückgang der pedogenen Oxide (Folge: Absinken des Speichervermögens für Schadstoffe) und zu einer Zunahme von gelösten Eisen- und Manganverbindungen. Viele Stoffe sind an diese Mechanismen gekoppelt und daher ist eine Zunahme deren Mobilität dann zu erwarten.

Starkregenereignisse verstärken den partikulär gebundenen Transport von Metallen und ihrer gelösten Fraktionen in tiefere Bodenschichten. Im Rahmen von Untersuchungen an Intensiv-Dauer-Beobachtungsflächen in Sachsen konnte z.B. an der BDF II in Hilbersdorf nach einem Starkregenereignis ein plötzlicher Anstieg der Sickerwassermenge verbunden mit einem deutlichen Konzentrationsanstieg von As-, Cd- und Pb-Konzentration in tieferen Bodenbereichen festgestellt werden (BARTH & FORBERG 2008). Durch die Zunahme der Starkregenereignisse wird der zum Grundwasser gerichtete Transport verstärkt.

Pestizide sind weit verbreitete Bodenschadstoffe. Sie können ebenfalls mit dem Sickerwasser in tiefere Bodenschichten und ins Grundwasser verlagert werden. Normalerweise wird ein großer Anteil von Pestiziden im humiden Klima mit einer Sickerwassergeschwindigkeit von einigen Metern pro Jahr quasi vollständig im Boden sorbiert (KLOTZ 1999). Dennoch werden diese Stoffe mitunter im Grundwasser nachgewiesen. Pestizide werden nicht nur an die Feststoffe des Bodens, sondern auch an die Trägerstoffe des Bodenwassers, wie Tonpartikel und Huminstoffe gebunden (KLOTZ 1999). Aufgrund der Wanderfähigkeit der Trägersubstanzen können Pestizide ins Grundwasser verlagert werden. Bei Starkregenereignissen treten überdurchschnittliche Sickerwassermengen auf (sog. Bypass-Flüsse) (SEILER 1994); das führt zu einem verstärkten Transport von Pestiziden in Unterböden. Da die Starkregenereignisse vor allem in Regionen wie z.B. Südwestdeutschland oder die Zentralen Mittelgebirge zunehmen, wird die sickerwassergebundene Verlagerung von Pestiziden und auch anderen Schadstoffen ins Grundwasser in den betroffenen Regionen vermutlich ansteigen (Tab. 3.20).

Tab. 3.20: Mögliche Auswirkungen des Klimawandels auf den Stoffhaushalt in Böden – gegliedert nach Regionen

Regionen	erwartete Klimaänderungen	Auswirkungen
Südwestdeutschland	Temperaturanstieg	▪ Erhöhung der mikrobiellen Aktivität → Erhöhung des Abbaus der OBS / Erhöhung der Bodenatmung → Erhöhung der CO_2-Freisetzung → Verringerung der Bodenkohlenstoffvorräte → geringeres Bindungsvermögen der OBS für Schadstoffe → Freisetzung und Verlagerung von Schadstoffen → potentiell erhöhter Stofftransfer in Nahrungs- und Futtermittel und / oder ▪ Erhöhung der Pflanzenproduktion → erhöhte CO_2-Bindung durch die Pflanze und dann im Boden → Erhöhung der Bodenkohlenstoffvorräte ▪ Abnahme der N-Vorräte im Boden → Beschleunigung der Nitrifikation → bei gut durchlässigen Böden verstärkte Nitratauswaschung
	häufigere sowie heftigere Starkregenereignisse höchste Zunahme des Niederschlags in ganz Deutschland (mit Zusammenhang mit der erhöhten Temperatur)	▪ anaerobe Verhältnisse/reduzierte Bedingungen, höhere Grundwasserstände mgl. → Hemmung des Abbaus der OBS → Humusanreicherung → Torfbildung (z.B. in Mooren, Anmooren, teilweise in Auenböden oder Marschen) → Rückgang von pedogenen Oxiden - Annahme des Bindungsvermögens für Schadstoffen – Austrag aus dem Boden in Grund-, Drainage- und Oberflächenwässer ▪ Zunahme des oberirdischen P- und N-Austrag ▪ Zunahme der P- und N-Mineralisation ▪ Zunahme der P-und N-Auswaschung ins Grundwasser ▪ Zunahme der Denitrifikation ▪ durch Zunahme der Sickerwassermenge Verlagerung von Schadstoffen in das Grundwasser ▪ Zunahme der Ausgasung von organischen und anorganischen Schadstoffen aus dem Boden ▪ Einfluss auf pedogenetische Verlagerungsprozesse
Zentrale Mittelgebirge	kühleres Klima (weniger starke Änderung der Frosttageanzahl), gebietsweise Verdopplung der Sommertage	▪ längere Vegetationsperiode - Erhöhung der mikrobiellen Aktivität → Erhöhung des Abbaus der OBS / Erhöhung der Bodenatmung → Erhöhung der CO_2-Freisetzung → Verringerung der Bodenkohlenstoffvorräte

Regionen	erwartete Klimaänderungen	Auswirkungen
		→ geringeres Bindungsvermögen der OBS für Schadstoffe → Freisetzung und Verlagerung von Schadstoffen → potentiell erhöhter Stofftransfer in Nahrungs- und Futtermittel und / oder ▪ Erhöhung der Pflanzenproduktion → erhöhte CO_2-Bindung durch die Pflanze und dann im Boden → Erhöhung der Bodenkohlenstoffvorräte ▪ Abnahme der N-Vorräte im Boden → Beschleunigung der Nitrifikation → bei gut durchlässigen Böden verstärkte Nitratauswaschung und Bodenversauerung
	hohes Niederschlagsniveau (Abnahme der Sommerniederschläge, erhebliche Zunahme der Winterniederschläge)	im Sommer: ▪ Einfluss auf den C- und N-Umsatz → verstärkte Freisetzung von organischem Bodenmaterial ▪ Einfluss auf die Mineralisierung je nach Dauer und Intensität der Trockenzeiten ▪ Auswirkung auf Qualität und Quantität der OBS im Winter: ▪ Verstärkt anaerobe Verhältnisse/reduzierte Bedingungen, höhere Grundwasserstände mgl. → Hemmung des Abbaus der OBS → Humusanreicherung → Torfbildung (z.B. in Mooren, Anmooren, teilweise in Auenböden oder Marschen) → Rückgang von pedogenen Oxiden - Annahme des Bindungsvermögens für Schadstoffen - Austrag aus dem Boden in Grund-, Drainage- und Oberflächenwässer ▪ Zunahme des oberirdischen P- und N-Austrag ▪ Zunahme der P- und N-Mineralisation ▪ Zunahme der P-und N-Auswaschung ins Grundwasser ▪ Zunahme der Denitrifikation ▪ durch Zunahme der Sickerwassermenge Verlagerung von Schadstoffen in das Grundwasser ▪ Zunahme der Ausgasung von organischen und anorganischen Schadstoffen aus den Boden ▪ Einfluss auf pedogenetische Verlagerungsprozesse (insbesondere Podsolierung)
Ostdeutschland (Zentral und Süden)	verstärkt gegenüber abnehmender Wasserverfügbarkeit anfällig	▪ Abnahme des Wassergehaltes (Bodentrockenheit) ▪ Senkung der mikrobiellen Aktivität → Senkung des OBS-Abbaus → Abnahme der Bodenfruchtbarkeit (und damit der Erträge)

Regionen	erwartete Klimaänderungen	Auswirkungen
	Dürregefahr im Sommer	→ Senkung der CO_2-Freisetzung → Erhöhung der Bodenkohlenstoffvorräte ▪ Verarmung der Vegetation und Streu → Humusgehalte gehen zurück ▪ durch Grundwasserabsenkung in den Niedermooren Mineralisierung des torfgebundenen N → Nitratausträge in Grundwasser
Alpen, Alb, südliches Hügelland, Süddeutschland	Jahresmitteltemperatur um 1,5 C gestiegen + weitere Temperaturzunahme alpine Gletscher ziehen sich seit 1850 kontinuierlich zurück	▪ Erhöhung der mikrobiellen Aktivität → Zunahme der Bodenatmung → Erhöhung der CO_2-Freisetzung → verstärkter Abbau der OBS → Abnahme der C-Vorräte im Boden → geringeres Bindungsvermögen der OBS für Schadstoffe → Freisetzung und Verlagerung von Schadstoffen → potentiell erhöhter Stofftransfer in Nahrungs- und Futtermittel ▪ Erhöhung der Pflanzenproduktion → erhöhte CO_2-Bindung durch die Pflanze und dann im Boden → Erhöhung der Bodenkohlenstoffvorräte ▪ Abnahme der N-Vorräte im Boden → Beschleunigung der Nitrifikation ▪ in Alpen: verstärktes Abtauen von Permafrostgebieten – organisches Material wird freigesetzt
	starke Verringerung der Niederschläge Verdunstung verbleibender Niederschläge erhöht	▪ Abnahme der mikrobiellen Aktivität → Senkung des OBS-Abbaus → Senkung der CO_2-Freisetzung → Erhöhung der Bodenkohlenstoffvorräte ▪ Verarmung der Vegetation und Streu → Humusgehalte gehen zurück ▪ durch Austrocknung der Böden höhere Schrumpfungsvorgänge in tonig-lehmigen Böden → Rissbildung → stärkere Oxidationsprozesse → höhere Salzkonzentration

Regionen	erwartete Klimaänderungen	Auswirkungen
Küstenregionen (Nordsee, Ostsee, Norddeutsches Tiefland)	In Küstenregionen und Nordostdeutschland weniger starke Temperaturzunahme (Bsp. Mecklenburg-Vorpommern) Veränderung der Häufigkeit von Temperaturkenntagen (Eistage, Frosttage, Sommertage, Tropennächte)	Längere Vegetationsperiode ▪ Erhöhung der mikrobiellen Aktivität → Erhöhung der Bodenatmung → Erhöhung der CO_2-Freisetzung → Erhöhung des Abbaus der OBS → Abnahme der C-Vorräte im Boden → geringeres Bindungsvermögen der OBS für Schadstoffe → Freisetzung und Verlagerung von Schadstoffen → potentiell erhöhter Stofftransfer in Nahrungs- und Futtermittel und / oder ▪ Erhöhung der Pflanzenproduktion → erhöhte CO_2-Bindung durch die Pflanze und dann im Boden → Erhöhung der C-Vorräte im Boden ▪ Abnahme der N-Vorräte im Boden → Beschleunigung der Nitrifikation ▪ bei gut durchlässigen Böden verstärkte Nitratauswaschung und Bodenversauerung Abnahme der Bodenfrosttage ▪ weniger Feinwurzeln sterben ab → geringerer Eintrag von organischem Material in den Boden

Regionen	erwartete Klimaänderungen	Auswirkungen
	besonders starke Abnahme der Sommerniederschläge für Ostseeküste überdurchschnittliche Zunahme der Winterniederschläge für Nordseeküste und das nordwestdeutsche Tiefland	im Sommer: ▪ Einfluss auf den C- und N-Umsatz → verstärkte Freisetzung von organischem Bodenmaterial ▪ Einfluss auf die Mineralisierung je nach Dauer und Intensität der Trockenzeiten ▪ Auswirkung auf Qualität und Quantität der OBS im Winter: ▪ anaerobe Verhältnisse/reduzierte Bedingungen, höhere Grundwasserstände möglich. → Hemmung des Abbaus der OBS → Humusanreicherung → Torfbildung (z.B. in Mooren, Anmooren, teilweise in Auenböden oder Marschen) → Rückgang von pedogenen Oxiden und Hydroxiden - Annahme des Bindungsvermögens für Schadstoffen - Austrag aus dem Boden in Grund-, Drainage- und Oberflächenwässer ▪ Zunahme des oberirdischen P- und N-Austrag ▪ Zunahme der P- und N-Mineralisation ▪ Zunahme der P-und N-Auswaschung ins Grundwasser ▪ Zunahme der Denitrifikation ▪ durch Zunahme der Sickerwassermenge Verlagerung von Schadstoffen in das Grundwasser ▪ Zunahme der Ausgasung von organischen und anorganischen Schadstoffen aus den Boden ▪ Einfluss auf pedogenetische Verlagerungsprozesse

Ausgasung von Stoffen aus Böden – Einfluss von Temperatur und Wassergehalt

Erhöhte Temperaturen und erhöhte Niederschläge können die Ausgasung von Schadstoffen aus Böden beschleunigen und fördern. Ein Beispiel für die Ausgasung von Stoffen aus Böden ist Quecksilber (Hg). Zwar ist Hg in Böden hauptsächlich stabil gebunden (OVERESCH et al. 2007; RINKLEBE et al. 2009, 2010) und wird daher vom Sickerwasser nur in sehr geringem Umfang (RINKLEBE, unveröffentl. Daten) und hauptsächlich in partikulärer Form (JOHANSSON & IVERFELDT 1994) ausgetragen. Allerdings bilden sich aus dem im Boden vorkommenden Hg (im Gegensatz zu anderen Schwermetallen) leicht flüchtige Verbindungen, die in die Umwelt freigesetzt werden können (RINKLEBE et al. 2009, 2010). Temperatur, Wassergehalt und Sonneneinstrahlung fördern die Ausgasung von Hg aus Böden (DURING et al. 2009; RINKLEBE et al. 2010; WALLSCHLÄGER et al. 2000; SONG & HEYST 2005). Die Erhöhung der Bodentemperatur bewirkt eine Zunahme der Hg-Ausgasung (ZHANG et al. 2003; DURING et al. 2009; RINKLEBE et al. 2009, 2010). Folglich ist zu vermuten, dass mit der klimabedingten Zunahme der Temperatur und in einigen Gebieten der Niederschläge die Gefahr von Hg-Ausgasungen ansteigt. Dieses Risiko ist v.a. an Hg-kontaminierten und besonders klimasensitiven Standorten (z.B. vielen Auenlandschaften) bedeutsam (RINKLEBE et al. 2007b, 2009, 2010; During et al. 2009).

Die Ausgasung von langlebigen organischen Schadstoffen (POP) aus Böden ist ebenfalls temperaturabhängig. In Untersuchungen von MA et al. (2004) wurde das Verhalten von POP (HCH, HCB und PCB) im Zusammenhang mit Fluktuationen der atmosphärischen Zirkulation untersucht. Es wurde festgestellt, dass z.B. im Frühling mit erhöhten Temperaturen höhere Konzentrationen von POP in der Luft gemessen wurden. Eine Ausgasung aus Böden wird vermutet.

Zunahme der Bodenvernässung durch höhere Niederschläge

In der Bodenlösung finden Oxidations- und Reduktionsprozesse (Redoxreaktionen) statt. Das Niederschlagsgeschehen beeinflusst u.a. auch die Redoxprozesse im Boden. Stärkere Niederschläge verursachen eine höhere Vernässung im Boden, die Sauerstoffmangel hervorruft; somit nehmen Reduktionsprozesse zu. Unter diesen anoxischen Bedingungen (niedrige Redoxpotentiale) weisen viele Elemente und Verbindungen eine höhere Löslichkeit auf und können dann schneller mobilisiert und in Pflanzen

und/oder das Grundwasser transferiert werden. Beispielsweise findet eine Arsenfreisetzung unter reduzierten Bedingungen in Folge von Vernässung in Grund-, Drainage- und Oberflächenwässer statt (OVERESCH et al. 2008). Durch reduzierende Bedingungen (z.B. in Folge eines steigenden Wassergehaltes) ist daher zu vermuten, dass sich die Konzentrationen von unter anaeroben Bedingungen in Lösung übergehenden Schadstoffen erhöhen werden.

Fazit:

Die Mobilität von Schadstoffen wird stark vom Gehalt an organischer Bodensubstanz (OBS) sowie von der Bodenreaktion (pH-Wert) beeinflusst. Nehmen z.B. der Gehalt an OBS oder der pH-Wert infolge des Klimawandels ab, so werden Schadstoffe im Boden verstärkt mobilisiert. Diese können durch die Erhöhung der Niederschlagsintensität mit dem Sickerwasser in das Grundwasser verlagert und/oder in Nahrungs- oder Futterpflanzen transferiert werden und/oder durch die Erhöhung der Temperatur aus Böden ausgasen. Der Rückgang der klimatischen Wasserbilanz im Sommerhalbjahr kann zu einer Verringerung der Abbauleistung und der Filterfunktion des Bodens für Schadstoffe führen (BMU 2008).

d) Weitere klimabeeinflusste Prozesse im Boden

Quellungs- und Schrumpfungsprozesse toniger Substrate sowie andere pedogenetische Vorgänge werden durch den Klimawandel beeinflusst. BLUME & MÜLLER-THOMSEN (2007) simulierten die durch den Klimawandel bedingte Bodenerwärmung und beobachteten die Auswirkungen auf Küstenfluvisole. Sie stellten eine Austrocknung der Böden fest und prognostizierten, dass in den tonig-lehmigen Böden während der trockenen Episoden im Sommer die Schrumpfung beschleunigt wird, so dass sich größere und tiefere Risse bilden. Als Folge werden Eisensulfide entlang der Aggregatoberflächen stärker oxidieren, wobei es zur Bildung von Ferrihydriten kommen kann.

Allgemeine pedogenetische Verlagerungsprozesse können durch die klimatische Veränderung beeinflusst werden. So verstärken hohe Niederschläge den Prozess der Podsolierung (STAHR et al. 2008).

Fazit:

Bodenbildende Prozesse werden durch veränderte Temperatur- und Niederschlagsverhältnisse beeinflusst, hierdurch können sekundär Bodenfunktionen beeinflusst werden.

Datenbedarf, Datenangebot und Dateneignung

Um die Auswirkungen des Klimawandels auf den Bodenstoffhaushalt bzw. auf die stoffliche Bodenbelastung zu analysieren, ist es zukünftig notwendig, folgende Parameter zu erfassen:

Standortbeschreibung	▪ Klimaparameter (Lufttemperatur, Niederschlag) ▪ Ausgangsgestein ▪ Profilbeschreibung / Bodenform ▪ Geländeform / Relief ▪ Vegetation ▪ Nutzung
Allgemeine, horizontbezogene bodenkundliche Größen	▪ pH-Wert ▪ Bodenart ▪ Bodentemperatur ▪ Kationenaustauschkapazität (KAK) ▪ Mikrobiologische Aktivität ▪ Redoxpotential ▪ Trockenrohdichte ▪ Stoffgehalte
Stoffgehalte	▪ C_{ges} ▪ C_{org} ▪ $C_{löslich}$ ▪ N_{ges} ▪ N_{mik} ▪ P_{ges} ▪ (Pseudo)Gesamtgehalte Metalle (aqua regia) ▪ Lösliche Fraktionen Metalle (z.B. NH_4NO_3) ▪ Organische Schadstoffe

Für die Modellierung von Stoffgehalten/-vorräten ist es sinnvoll, eine „Baseline“ zu ermitteln. Die vorliegenden Daten verschiedener Messprogramme sollten hier systematisch verknüpft werden. Hierzu bieten sich die Inventuren des ICP-Forest, der BZE I und der Basis-BDF an, die alle Daten eines Zeitraumes (Mitte 80 bis Anfang 90) liefern. Ein Datenpool von weit über 1.500 Standorten steht somit zur Berechnung einer Baseline für verschiedene Stoffe zur Verfügung.

Die Basisstandorte der Boden-Dauerbeobachtung (Basis-BDF) werden in regelmäßigen Abständen untersucht, um Veränderungen des Bodenzustands festzustellen. Teilweise werden die Daten seit 1985 (z.B. in Bayern) erhoben. Neben den allgemeinen klimatischen, bodenkundlichen und -physikalischen Parametern nehmen die bodenchemischen Untersuchungen einen wichtigen Bereich ein. So sollten in einem Abstand von > 5 Jahren als obligate Untersuchungsparameter die Kohlenstoff- (C_{ges} und C_{org}), Nährstoff- und Schadstoffgehalte[14] ermittelt werden. Zum Teil werden jedoch nur die C_{org}-Gehalte ermittelt. Bei den fakultativen Parametern (z.B. Schwefel (lösliche Fraktion), NO_3-N, NH_4-N) kann nicht von einem regelhaften Vorliegen der Daten ausgegangen werden. Zur Betrachtung des Stofftransports innerhalb des Bodens können die Parameter, die im Rahmen der Messungen zum Bodenwasser (z.B. kf-Werte, Porenvolumen) durchgeführt werden, verwendet werden.

Die Messstellen der Intensiv-Boden-Dauerbeobachtung (Intensiv-BDF) wurden installiert, um die zeitliche Dynamik von im Boden ablaufenden Prozessen besser zu erfassen. Die Konzentration von C_{ges} und von Nähr- und Schadstoffen in den Sickerwasserausträgen sind Größen, die zur Beantwortung der Veränderungen des Bodenstoffhaushalts herangezogen werden können. Ein besonderes Augenmerk der Intensiv-BDF bilden Messungen zu Stoffein- und Stoffausträgen. Dabei werden kontinuierlich Daten zum Bodensickerwasser und Grundwasser, zum Stoffeintrag und zum Klima erhoben.

Die landwirtschaftlichen Dauerfeldversuche sowie die Feldlysimeter-Dauerversuche, von denen zahlreiche in Deutschland durchgeführt werden, sind ein wichtiges Instrument um Prozessabläufe im Boden über einen längeren Zeitraum zu beobachten.

---

[14] Bei besonderen Ereignissen können auch zusätzliche Messungen erfolgen.

Dabei ist es bereits möglich, Aussagen bezüglich der Klimaauswirkungen auf bestimmte Bodenprozesse (Einstellung von Fließgleichgewichten) und -funktionen (z.B. C-sink-source-Funktion) vorzunehmen. Ein wichtiges Beispiel liefern die Untersuchungen des „Statischen Nährmangelversuchs“ in Thyrow (ELLMER 2008). Dabei wurden die Veränderungen der C_{org}-Gehalte im Boden in den letzten 40 Jahren betrachtet (s.o.).

Das Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen führt seit 1991 auf der Lysimeteranlage Waldfeucht (Kreis Heinsberg, im Westen von Nordrhein-Westfalen) ein umfangreiches Untersuchungsprogramm durch, wobei u.a. auch das Verhalten von PAK (und PCB) im System Boden/Pflanze untersucht wird (DELSCHEN et al. 1999). Bei einem längeren Betrieb dieser Anlage kann durch zusätzliche Einbeziehung von Klimaparameter das zeitliche Verhalten der PAK unter klimabedingten Änderungen herangezogen werden.

Weitere Parameter werden an den Messstationen der Projekte ICP Forest Level I und II, BZE I und II, Umweltprobenbank (UPB) (Probenart Boden) sowie im Rahmen der Bodenschätzung erfasst.

Generell ist es eine besondere Herausforderung, den Stoffhaushalt flächenhaft zu erfassen, adäquat abzubilden und letztlich mit hinreichender Genauigkeit zu prognostizieren.

Projekte und Forschungsvorhaben

In Deutschland und Europa gibt es zahlreiche laufende und abgeschlossene Projekte und Forschungsvorhaben (siehe Tabelle 3.21), die sich mit den Veränderungen des Bodenstoffhaushalts durch den Klimawandel befassen. Im Folgenden soll eine kleine Auswahl dieser Projekte kurz vorgestellt werden.

In dem europäischen Projekt CarboEurope sollen auf zahlreichen Untersuchungsflächen die Kohlenstoffflüsse und die Kohlenstoffbilanz in Ökosystemen analysiert werden. Seit 2003, z.T. auch schon seit 1994, werden 50 dieser Flächen mit einem intensiven Messprogramm über mindestens fünf Jahre betrieben. Die Flächen liegen in ganz Europa und repräsentieren die wichtigsten Klima- und Landschaftszonen (SCHRUMPF & FREIBAUER 2008).

Die Universität Hohenheim hat versucht, in dem bereits abgeschlossenen Forschungsvorhaben „Bewertung von Strategien zur Vermeidung von CO_2-Emissionen aus der landwirtschaftlichen Nutzung in Baden-Württemberg“ den Beitrag landwirtschaftlicher Böden zur CO_2-Minderung abzuschätzen (ANGENENDT et al. 2007). Dabei wurden verschiedene Maßnahmenszenarien untersucht: Etablierung von Grünland, Umstellung auf konservierende Bodenbearbeitung und Wiedervernässung von Mooren/humosen Mineralböden. Die Ergebnisse zeigen, dass sich nach einer 22-jähriger Wiedervernässung eines Niedermoors und nach einer ca. 20-jährigen Grünlandbewirtschaftung das C-Speicherpotenzial in den Böden vergrößert hat.

In Bayern ist ein Forschungsprojekt geplant, das die Auswirkungen des Klimawandels auf Humusmenge und -qualität von Bayerns Böden dokumentieren und bewerten soll (BU-/LABO 2009). Es sollen Untersuchungen des Humusgehalts durchgeführt werden, um in Verbindung mit Modellsimulationen und Standortdaten Aussagen zu möglichen Speicherpotentialen zu treffen und eine Beurteilung des Humuszustandes für möglichst flächentypische bayerische Böden vorzunehmen.

In Brandenburg wird mit HYDBOS, einem Teilprojekt des Forschungsvorhabens INKA[15], ein Beratungstool für die Nutzung und den Schutz hydromorpher Böden unter geänderten Klimabedingungen entwickelt. Weiterhin wird in Brandenburg von 2009 bis 2014 ein Projekt mit dem Namen „CarboZALF – Der Kohlenstoffhaushalt von Agrarlandschaften im globalen Wandel“ bearbeitet, dass den Einfluss von Bewirtschaftung und Standort auf den Spurengasaustausch, die Klimawirkung (GWP) und den OBS-Vorrat beim Energiepflanzenanbau in der Norddeutschen Glaziallandschaft untersuchen soll (BU-/LABO 2009).

---

[15] INKA BB – Innovationsnetzwerk Klimaanpassung in der Region Berlin-Brandenburg, Projekt vom BMBF mit einer Laufzeit von 2009 – 2013

Tab. 3.21: Ausgewählte Projekte und Forschungsvorhaben für Untersuchungen der klimabedingten Veränderungen des Bodenstoffhaushaltes

Name des Projektes / Forschungsvorhabens	Laufzeit	Projektförderer/ durchgeführt von bzw. in	untersuchte Größen
CarboEurope	1994 –	Europa	Kohlenstoffflüsse und -bilanz
Bewertung von Strategien zur Vermeidung von CO_2-Emissionen aus der landwirtschaftlichen Nutzung in Baden-Württemberg	bis 2007	Universität Hohenheim	CO_2-Freisetzung
Forschungsprojekt		Freistaat Bayern	Humusmenge und -qualität
HYDBOS – als Teilprojekt des Forschungsvorhaben KLIMZUG INKA BB	2009 – 2013	BMBF, Brandenburg	hydromorphe Böden
CarboZALF – Der Kohlenstoffhaushalt von Agrarlandschaften im globalen Wandel	2009 – 2014	DBU, Brandenburg	u.a. Spurengasaustausch, OBS-Vorrat
CARBSTOR	k.A.	DBU	C-Speicherung und C-Freisetzungspotenzial
Humusmonitoringprogramm von Nordrhein-Westfalen	seit 2009	Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen	Humusgehalt, Humus-Fraktionierung
Auswirkungen differenzierter Land- und Bodenbewirtschaftung auf den C-Haushalt der Böden unter Berücksichtigung konkreter Szenarien der prognostizierten Klimaänderung	seit 2007	Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie	C-Haushalt
KliWEP – Abschätzung der Auswirkungen der für Sachsen prognostizierten Klimaveränderungen auf den Wasser- und Stoffhaushalt im Einzugsgebiet der Parthe	2004 – 2010	Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie	Wasser- und Stoffhaushalt
Sicherstellen der landwirtschaftlichen Produktion mit Zusatzwasserbedarf bei veränderten klimatischen Bedingungen – Maßnahmen für ein nachhaltiges Grundwassermanagement sowie Anbauempfehlungen für die landwirtschaftliche Produktion im Hessischen Ried	in Bearbeitung	Hessische Landesamt für Umwelt und Geologie in Zusammenarbeit mit der Universität Gießen	Kohlenstofffreisetzung

In den Verbund-DBU-Vorhaben Carbstor wird ein Vorhersagetool für die C-Speicherung und das C-Freisetzungspotential von organischen Böden entwickelt. Das Vorhersagetool dient dazu, auf der Ebene des Bundes die Berichterstattung im internationalen Kontext zu verbessern und im regionalen Maßstab auf Länderebene Entscheidungen für das Management von Landschaften mit organischen Böden zu unterstützen (BU-/LABO 2009).

Das Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz von Nordrhein-Westfalen (NRW) führt derzeit ein Untersuchungsvorhaben zum Humusstatus von Ackerböden in NRW durch. Es werden u.a. die klimatisch bedingten Veränderungen der Humusgehalte untersucht (HÄDICKE 2009). Im Rahmen dieses Humusmonitoringprogramms von NRW soll eine schnelle und kostengünstige Methode zur Differenzierung des organischen Kohlenstoffs entwickelt werden, da angenommen wird, dass Auswirkungen von Klimaänderungen schneller in der labilen C-Fraktion erkennbar sein werden. In einem Teilprojekt werden Methoden zur Humusfraktionierung erforscht. Dabei soll der fein- und grobpartikuläre Kohlenstoff (POM: particulate organic matter) und des inerten Kohlenstoffs mittels konventioneller Methode quantifiziert und aus MIR-Spektren abgeleitet werden (BU-/LABO 2009).

In Sachsen werden die Auswirkungen differenzierter Land- und Bodenbewirtschaftung auf den C-Haushalt der Böden unter Berücksichtigung konkreter Szenarien der prognostizierten Klimaänderung untersucht (BU-/LABO 2009).

Das Forschungsprojekt „Abschätzung der Auswirkungen der für Sachsen prognostizierten **Kli**maveränderungen auf den **W**asser- und Stoffhaushalt im **E**inzugsgebiet der **P**arthe“ (KliWEP) wird vom Sächsischen Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie von 2004 bis 2010 durchgeführt (SMUL 2009) (Nähere Informationen zum Projekt siehe Kap. 3.3.2).

In dem Projekt „Sicherstellen der landwirtschaftlichen Produktion mit Zusatzwasserbedarf bei veränderten klimatischen Bedingungen – Maßnahmen für ein nachhaltiges Grundwassermanagement sowie Anbauempfehlungen für die landwirtschaftliche Produktion im Hessischen Ried“ versucht das Hessische Landesamt für Umwelt und Geologie in Zusammenarbeit mit der Universität Gießen, Erkenntnisse zur Kohlenstofffreisetzung durch Inkubationsversuche verschiedener hessischer Böden und kontrollierten

Klimabedingungen im Labor zu gewinnen (HMULV 2007). Ergebnisse werden demnächst erwartet.

Modellierungen zum Bodenstoffhaushalt

Modelle, die Aussagen zur Entwicklung des Bodenstoffhaushalts liefern können, sind wichtige Werkzeuge im Rahmen der Klimaforschung bzw. der bodenseitigen Folgenabschätzung des Klimawandels (siehe Tabelle 3.22).

Das Modell STOTRASIM ermittelt z.B. die Wasser- und Stickstoffdynamik im Bodenprofil eines Ackerstandortes in vertikaler Richtung (FEICHTINGER 2008). Es beschreibt u.a. auch die N- und partiell die C-Dynamik eines landwirtschaftlich genutzten Bodens.

Tab. 3.22: Beispiele für Modellierungen zum Bodenstoffhaushalt

Modellbezeichnung	**Kurzbeschreibung**
STOTRASIM	u.a. Ermittlung der H_2O- , N- und C-Dynamik in Ackerböden
CENTURY – Soil Organic MatterModell	Agrarökologisches Modell, untersucht Dynamik von C, N, P und S
Rothamsted Carbon (RothC-) Model	C-Verhalten in Böden
Soil & Water Assessment Tool (SWAT-Model)	Quantifizierung des Einflusses der Landwirtschaft in einem Flusseinzugsgebiet

Zu den zwei bekanntesten biogeochemischen Modellen, die sich mit dem Verhalten des C befassen, gehören das CENTURY-(PARTON et al. 1987) und das ROTH-C-(JENKINSON 1990) Modell. Die Version 5 ist die neuste Version des CENTURY Soil Organic Matter Model. Es ist ein agrarökologisches Modell, welches die Dynamiken von C, N, P und S über den Jahresverlauf sowie über Jahrhunderte oder Jahrtausende simuliert (NREL 2009). Mit dem Rothamsted Carbon Model (RothC) ist es möglich, die Auswirkungen der Bewirtschaftung des organischen Materials auf den organischen Kohlenstoff im Boden von nicht durchnässten Oberböden für einige Jahre oder Jahrhunderten zu ermitteln (COLEMAN & JENKINSON 1999).

Ein weiteres Model ist das SWAT-Model (Soil & Water Assessment Tool). Es ist ein Flussgebietsskalenmodel, welches entwickelt wurde, um den Einfluss der Landnutzung innerhalb eines großen komplexen Flusseinzugsgebiets zu quantifizieren (USDA-ARS 2009).

Für Bilanzierungen und Modellierungen zum Stoffhaushalt werden bestimmte Daten benötigt. Woher die Daten stammen bzw. wie sie gewonnen werden können, soll im Folgenden anhand einer Unterteilung nach den wichtigsten Einflussgrößen betrachtet werden:

1. **Ein- und Austräge –** Zur Bilanzierung und Modellierung sind Informationen über die ein- und ausgetragene Stoffmenge notwendig. Zu den relevanten Informationen zählen beispielsweise Einträge durch Deposition, Düngung aber auch kapillarem Aufstieg sowie Austräge durch z.B. Sickerwasser, Pflanzenentzug (Ernte) oder Ausgasung. Die Genauigkeit der entsprechenden Informationen hängt vom Maßstab der Betrachtung ab. Daten von Lysimeteranlagen, Intensiv-BDF, Level II und Dauerfeldversuchen erfüllen meistens die Anforderungen für Modellierung. Je nach Genauigkeit des Modells können jedoch einzelne Parameter (häufig Ausgasung) fehlen. Die Ableitung fehlender Größen über Ersatzparameter (z.B. Basalatmung) ist modellabhängig. Teilweise verfügen auch Basis-BDF über die notwendigen Informationen.

2. **Stofftransport** – Dieser wird durch den Klimawandel möglicherweise durch einen veränderten Wasserfluss (in und auf dem Boden) beeinflusst. Zur Erfassung dieser Vorgänge sind die Daten der Intensiv-BDF ausreichend. Allerdings ist die Quantifizierung für bestimmte Formen des Stofftransports (z.B. preferential flow, partikelgebundener Transport) derzeit kaum präzise in der Landschaftskala möglich.

3. **Sorption von Schadstoffen** – Für zahlreiche anorganische Schadstoffe existieren umfangreiche Untersuchungen zur Gleichgewichtssorption (Adsorptionsisothermen), die für substratübergreifende Betrachtungen als sog. Pedotransfer-Funktionen bereitgestellt sind (z.B. UTERMANN et al. 2005; HEIDKAMP 2005). Für organische Schadstoffe können K_{OC}-Werte (Kd bezogen auf die organische Substanz) verwendet werden. Allerdings ist ungeklärt, inwieweit sich veränderte kli-

matische Randbedingungen auf den partikelgebundenen Transport (z.B. von DOC) bzw. das Ausmaß von präferentiellen Fließphänomenen auswirken. Generell ist eine Veränderung der Sorptionseigenschaften der Böden durch den Klimawandel nicht auszuschließen. Zum Beispiel wird die OBS in ihrer Qualität und Quantität beeinflusst. Unter Nutzung der substratübergreifenden Sorptionsisothermen ließen sich Sensivitätsanalysen zum Einfluss veränderter C_{org}-Gehalte auf das Bindungsvermögen der Böden gegenüber anorganischen Schadstoffen durchführen. Hierdurch könnten erste quantitative Einschätzungen zu den Klimawandel-bedingten Auswirkungen auf die Sorption/Freisetzung von Schadstoffen vorgenommen werden. Der hierzu erforderliche Datenbedarf lässt sich aus der Literatur und durch die Level I-Standorte abdecken. Die Verifizierung der Hypothesen könnten an den Level II-Standorten vorgenommen werden. Die Daten der Basis-BDF können eine sinnvolle Ergänzung des Datenbestandes liefern.

4. **Lösung/Fällung** – Diese Prozesse spielen vermutlich in Regionen mit einer zeitweise negativen Wasserbilanz eine Rolle. Es sind vermutlich Effekte zu beobachten, die zu einer zeitweisen Immobilisierung der Stoffe führen. Der Datenbedarf könnte im Wesentlichen über den Wasserhaushalt in Kombination mit physiko-chemischer Gleichgewichtsmodellierung gedeckt werden.

5. **Abbau** – Der Schadstoffab- und umbau im Boden kann mikrobiell oder bodenchemisch erfolgen. Außerdem sind diese Prozesse von der Temperatur und vom Wassergehalt abhängig. Diese Vorgänge sind mathematisch beschreibbar, z.B. über die Arrhenius-Funktion. Die durch die erhöhte Temperatur beschleunigten Abbauvorgänge sollten sich auch anhand von Sensitivitätsanalysen einschätzen lassen.

6. **Mineralisation** – Die Umsetzung der OBS und damit die C- und N-Freisetzung ist u.a. abhängig von Temperatur und Wassergehalt. Das kann durch Modelle und die die bekannten Ansätze von RICHTER et al. (1985) auf der Grundlange von Brutversuchen beschrieben werden. Die Mobilisierung/Immobilisierung von Nähr- und Schadstoffen könnte über eine prozessbasierte Modellierung oder Bilanzierung erfolgen. Dazu können die Daten der BZE I und II verwendet werden.

Fazit zur Eignung / Aussagekraft:

Die zur Untersuchung der Veränderungen des C-Haushalts im Boden wichtigen Parameter C_{ges}, C_{org} werden als obligate Messgrößen im Rahmen der Basis-BDF mit einer Erfassungshäufigkeit nach BARTH et al. (2001) von > 5 Jahren erfasst. Um die Veränderungen im C-Haushalt von Böden sachgerecht zu erfassen, sind jedoch relativ lange Beobachtungszeiträume notwendig (z.B. KÖRSCHENS et al. 2005).

Nähr- und Schadstoffgehalte in Böden werden an den Basis-BDF in Abständen von > 5 Jahren erfasst, was die Erfassung von klimabedingten Änderungen in Böden deutlich erschwert. Für verschiedene fakultative Parameter wie P und K (CAL-Methode) sowie löslichen Schwefel sind zeitlich höhere Auflösungen empfohlen (BARTH et al. 2001).

Veränderung der OBS können bezüglich C_{org} detektiert werden (z.B. BZE). Um klimabedingte Veränderungen räumlich zu bestimmen, reichen die Daten jedoch derzeit vermutlich nicht aus.

Grundsätzlich liefern die Bestimmung der gelösten und in die Bodenlösung überführbaren (= leicht mobilisierbaren) Schadstoffgehalte bessere Beurteilungsmöglichkeiten zum Schadstoffhaushalt, da diese Stoffe im Wesentlichen den ökologisch wirksamen Anteil im Boden darstellen (BLUME et al. 2002). Derzeit werden routinemäßig auf Basis-BDF nur die Metallgehalte im Königswasserextrakt gemessen. Dies ist jedoch nicht ausreichend, um Veränderungen innerhalb weniger Jahre abzubilden oder nachzuweisen.

Die Daten, die an den Messstationen der Projekte ICP Forest Level I / BZE I und II sowie der Bodenschätzung ermittelt werden, sind nur bedingt zur Untersuchung der Veränderungen des Bodenstoffhaushalts durch den Klimawandel geeignet. Oft wird nur eine einmalige Erhebung durchgeführt oder die räumliche Abdeckung mit Messstationen ist nicht ausreichend, da sich einige Bundesländer in Deutschland nicht an allen Projekten beteiligen.

Generell sind folgende Defizite festzustellen:

- Sensibel reagierende Parameter werden häufig nicht gemessen (z.B. Kohlenstofffraktionen, mobile Metallgehalte).

- Die für unterschiedliche Stoffe bedeutsamen saisonalen Einflüsse (C, N) können aufgrund zu geringer Messintervalle oft nicht erfasst werden.
- Die Ausgasung spielt für einige Schadstoffe (z.B. As, Hg, verschiedene organische Schadstoffe) eine wichtige Rolle. Die Ausgasung wird derzeit in keinem der bundesweiten Monitoringprogramme berücksichtigt.
- Fortschreitende Technik und bisher uneinheitliches Vorgehen bei der Analytik erschweren eine Verwendung von Daten, teilweise sogar innerhalb eines Messprogramms.

Im Rahmen der Dauerfeldversuche werden bestimmte Fragestellungen untersucht. Sie bilden eine wichtige Ergänzung, um Veränderungen der stoffgebundenen Prozesse (z.B. die Sorption von Schadstoffen an die OBS) im Boden über längere Zeiträume und somit auch klimabedingte Veränderungen zu betrachten. Die Daten der Dauerfeldversuche erscheinen insbesondere für die langfristige Erfassung der Kohlenstoffdynamik geeignet.

Die Daten der Boden-Dauerbeobachtung erweisen sich unter den gegenwärtig vorhandenen Messprogrammen /-projekten als am besten geeignet, um klimabedingte Veränderungen des Bodenstoffhaushaltes zu untersuchen. Sie haben ein hochauflösendes Messnetz und liefern daher den größten Datenpool. Die Daten der ICP Forest Level II weisen eine mit den Intensiv-BDF vergleichbare Qualität und Eignung auf. Die Daten der anderen Programme und Projekte sind dennoch bedeutsam und sollten nicht unbeachtet bleiben. Inventurdaten, wie jene der BZE sollten zukünftig mit den Auswertungen der Boden-Dauerbeobachtung verknüpft werden. Die im Monitoring identifizierten Prozesse sollten bei der Bewertung von Ergebnissen der Zustandserhebungen unterschiedlicher Zeitschnitte (z.B. BZE I und II) berücksichtigt werden.

Die Daten der Umweltprobenbank stellen ebenfalls einen wertvollen Datenpool dar. Aufgrund der vergleichsweise geringen Anzahl von Standorten sind sie eher als Ergänzung zu den anderen Monitoringprogrammen anzusehen.

Um den Einfluss der klimabedingten Änderungen auf den Bodenstoffhaushalt zu untersuchen, ist außerdem die Anwendung von Stofftransport- und Stoffumsatzmodellen gut geeignet (s.o.). Die Anforderungen an Daten für OBS-Modelle sind bisher nicht eindeu-

tig für das Monitoring definiert. Hinsichtlich Schadstoffe liegen Modelle vor, es fehlt jedoch eine geeignete Parametrisierung.

Die Datenerfassung hinsichtlich N- und P-Haushalt scheint gegenwärtig ausreichend zu sein. Sie ermöglicht eine Messung und Auswertung hinsichtlich des Klimaeinflusses. Jedoch scheint eine Abbildung des N-Kreislaufs (insbesondere der Mineralisation) mittels Prognosemodellen unzureichend.

Insgesamt muss die Datenverfügbarkeit als nicht ausreichend betrachtet werden. Hinsichtlich Repräsentanz, Regionalisierungsansätzen und flächenhafter Übertragung sind die Daten unzureichend (z.B. Waldökosystemtypen). Hier sollten regionale Klimamodelle Voraussetzung sein.

Empfehlungen für künftige(s) Monitoring und Erhebungen

- Erhebung sensibler Parameter zur Untersuchung der Veränderungen der OBS. Diese sollten in der Lage sein, saisonale Änderungen/Einflüsse (z.B. Bewirtschaftungs- und/oder Klimaänderungen) treffgenauer und möglichst zeitnah abzubilden. Integration unterschiedlich stabiler C-Fraktionen der OBS in zukünftige regelmäßig durchzuführende Messprogramme
- Eindeutige Definition der Datenanforderungen an OBS-Modelle für das Monitoring, einschließlich einer geeigneten Parametrisierung.
- Anpassung der Beprobungsintervalle, um die zeitliche Stoffdynamik (z.B. Saisonalitäten) adäquat zu detektieren. Wichtig sind außerdem die Bewertung der ökologischen Wirksamkeit sowie der zeitlichen und räumlichen Auflösung. Die Informationen aus der Düngeempfehlung der VDLUFA sollten mindestens regionenspezifisch verfügbar gemacht werden.
- Methodendokumentationen, -abgleich, -vereinheitlichung und -normung. Zusätzlich sollte eine Qualitätskontrolle der Laboratorien sowie ein Standardisierung der Datenhaltung erfolgen (z.B. Methodendokumentation).
- Detaillierte Erfassung der chemischen Zusammensetzung des Niederschlags sowie des Staubniederschlags.

- Überprüfung der erfassten Parameter hinsichtlich organischer Schadstoffe (insbes. Biozide).
- Einführung kürzerer Messabschnitte auch zu unterschiedlichen Jahreszeiten, um den zeitlichen Trend und Extremjahre besser erfassen zu können. Um zusätzliche Kosten zu vermeiden, sollten saisonale Messungen mindestens an ausgewählten Standorten in den Klimaregionen durchgeführt werden.
- Integration mobiler Fraktionen von Spurenmetallen in das Basis-BDF Messprogramm, sofern nicht bereits enthalten. Zu empfehlen wäre bspw. eine NH_4NO_3-Extraktion, da diese eine standardisierte Methode ist und bereits im BBodSchG (bzw. BBodSchV) rechtlich verankert ist. Ein vielversprechender Datenpool könnten die BDF-Daten sein, da der Gehalt an extrahierbaren (NH_4NO_3-Extrakt) Schwermetallen und Arsen als ergänzend zu untersuchen empfohlen wird. Generell kämen aus wissenschaftlicher Sicht aber auch andere Extraktionsmethoden und Extraktionsmittel in Frage. Beispielsweise wären für Modellierungen die Messung der sorbierten Fraktion (EDTA oder Isotopenverdünnungsmethode und der gelösten Fraktion (z.B. Wasser-Feststoffverhältnis 2:1)) zielführend.
- Wiederholte Untersuchungen mit gleichem Erhebungsraster und vergleichbaren Methoden zur Erfassung von Veränderungen des Bodenzustands. Bei den BZE-Untersuchungen wird jeweils der aktuelle Bodenzustand erfasst. Veränderungen lassen sich nur durch Folgeuntersuchungen (mindestens zwei) analysieren. Der Vergleich der Ergebnisse der BZE I und BZE II ist nicht ausreichend, da auch durch methodische Besonderheiten, durch den langsamen Verlauf vieler bodenchemischer Prozesse sowie durch Schwächen der Erstinventur (BZE I) der Vergleich schwierig ist (BMELV 2007). Die Boden-Dauerbeobachtung (z.B. auf den BZE II-Flächen) wird daher als wichtige Ergänzung der BZE II angesehen (BMELV 2007). Die Ergebnisse der BZE-Untersuchungen werden aber auch eine wichtige Grundlage für den Vergleich von BZE-Folgeinventuren und der Boden-Dauerbeobachtung sein. Problematisch bei den Programmen der BZE und BDF ist die bisher geringe Wiederholungsanzahl. Aussagen auf der Basis von ein oder zwei Wiederholungsuntersuchungen zu treffen ist statistisch nicht haltbar. Die Ergebnisse werden mit der Zeit und sich vergrößerndem Datenpool jedoch aussagekräftiger.

- Messung der Ausgasung schädlicher Stoffe auf repräsentativen, ausgewählten Standorten unter Berücksichtigung der zeitlichen Dynamik.
- Einbeziehung der Unterböden bei Beprobung, Analyse, Interpretation und Bewertung.
- Berücksichtigung der Sonderrolle der besonders sensibel reagierenden Organoböden (Moore / Auenböden) in Monitoringprogrammen.

3.3.4 Bodenmikrobiologie

J. Rinklebe; A. Prüß

Vorbemerkung

Die mikrobielle Biomasse ist der Anteil der organischen Bodensubstanz (OBS), der aus lebenden Mikroorganismen besteht (ALEF 1991). Bodenmikroorganismen überführen organische Substanzen in anorganische Formen, in der sie z.B. von Pflanzen wieder aufgenommen werden können (GISI 1997). Die mikrobielle Biomasse ist zusätzlich ein wichtiger Zwischenspeicher von Pflanzennährstoffen. Bodenmikroorganismen sind als Vermittler beim Stoffumsatz an einer Vielzahl im Boden ablaufender Prozesse beteiligt.

Der in Bodenmikroorganismen gebundene Kohlenstoff wird zwischen 0,2 und 3,9-mal pro Jahr umgesetzt. In einem Waldboden kann der Kohlenstofffluss durch die mikrobielle Biomasse somit beispielsweise 540 kg C $ha^{-1}a^{-1}$ aufweisen. Die Bodenmikroorganismen bilden somit einen wichtigen (mehr oder weniger) kurzfristigen Speicher für Kohlenstoff und verschiedene Nährstoffe. Trotz des geringen Anteils an der gesamten organischen Bodensubstanz (OBS) von nur ca. 3 % setzen die Bodenmikroorganismen die größte Menge an organischem Kohlenstoff im Boden um (JÖRGENSEN 1995).

Die Vielfalt und Anzahl der im Boden lebenden Organismen ist sehr groß. In einer untersuchten Bodenprobe konnten etwa 10.000 verschiedene Genome von Mikroorganismen ermittelt werden. Im Vergleich dazu wurden in einer Probe aus einem Fischteich nur 80 und in einer Probe eines marinen Küstensediments ca. 1.000 verschiedene Genome von Mikroorganismen gefunden (SCHINK 2007). Die im Boden leben Mik-

roorganismen weisen aufgrund heterogener Standorteigenschaften, wie z.B. der Temperatur (25 °C bis zu über 50 °C), eine große Vielfalt auf.

Wichtige Vertreter der Bodenmikroorganismen sind Bakterien, Archaeen und Pilze. Dabei zählen die Bakterien zu den am häufigsten vorkommenden Bodenmikroorganismen, die in allen Bodentypen auftreten können. Je nach Art der Bakterien reagieren diese unterschiedlich auf Veränderungen der Bodenverhältnisse. Actinomyceten und Streptomyceten z.B. sind sensibel gegenüber einer Austrocknung von Böden. Verschiedene Arten der Pilze können unter extremen Umgebungen mit geringem pH-Wert, sehr hoher oder niedriger Temperatur wachsen. Bakterien sind tolerant gegenüber unterschiedlichen Temperaturen, pH-Werten und Salzkonzentrationen.

Die meisten biochemischen Reaktionen im Boden werden von Enzymen katalysiert (TABATABAI & DICK 2002). Diese sind entscheidend an den vielfältigen Stoffumsetzungen im Boden wie z.B. bei der Mineralisierung, Humifizierung oder bei Redoxprozessen beteiligt (SCHINNER et al. 1993; SCHINNER & SONNLEITNER 1996; GISI 1997).

Die Aktivität von Bodenmikroorganismen wird wesentlich durch den Wasser- und Wärmehaushalt des Bodens (hydrothermales Regime), durch verfügbare organische Substanzen, die Bodenart, den pH-Wert, den O_2-Gehalt und durch den Schadstoffhaushalt gesteuert.

Klimaänderungen und Wirkungsprognose

Bodenmikroorganismen werden entscheidend vom Wasser- und Wärmehaushalt des Bodens beeinflusst. Die erwarteten klimabedingten Niederschlagsverschiebungen und Temperaturveränderungen werden folglich einen deutlichen Einfluss auf die mikrobiellen Populationen und Aktivitäten ausüben. Die verschiedenen Bodenmikroorganismen weisen unterschiedliche Temperatur- und Feuchtigkeitsoptima auf (siehe Tabelle 3.23), wodurch die Sensibilität gegenüber klimatischen Veränderungen verdeutlicht wird. SCHINNER & SONNLEITNER (1996) sehen als optimalen Temperaturbereich mesophiler Bodenmikroorganismen 20 bis 35 °C an. ZAK et al. (1999) erzielen die höchsten Bodenatmungsraten bei einer Wasserspannung von 100 mbar und 25 °C, bei niedrigeren Temperaturen ist die Atmungsrate wesentlich geringer.

Tab. 3.23: Temperatur- und Feuchtigkeitsoptimum verschiedener Bodenmikroorganismen (FEHER & FRANK 1937)

Bodenmikroorganismen	Temperatur-optimum [°C]	Feuchtigkeitsoptimum	
		Wassergehalt [%] des Bodens	Wassergehalt [%] der Wasser-kapazität
Nitrifizierende Bakterien	30 bis 35	30	79
Stickstoffbindende Bakterien	25	25	66
Cellulosezersetzende Bakterien	25	30	79
Sonstige Bakterien	25	25	66
Aerobe Pilze	25	15	40
Algen	25	25	66

Einflussgrößen auf Bodenmikroorganismen und deren Reaktionen

1. Wasser

Bodenfeuchtedynamik und Wasserspannung steuern maßgeblich die zeitliche Variabilität der mikrobiellen Biomasse (SCHINNER & SONNLEITNER 1996; PAUL & CLARK 1996). Hohe Grundwasserstände und Überflutungen können jedoch zu einer Reduktion der mikrobiellen Aktivität aufgrund des Überangebotes an Wasser und Sauerstoffmangel führen (NLFB 2001; RINKLEBE 2004; RINKLEBE & LANGER 2006, 2008). Trockenzeiten üben ebenfalls einen starken Einfluss auf die Aktivität der Bodenmikroorganismen aus und verringern die biologische Abbauleistung und die Nährstoffverfügbarkeit durch die Unterversorgung mit Wasser (RINKLEBE 2004; LANGER & RINKLEBE 2009).

Die Aktivität der Mikroorganismen und die Verfügbarkeit von zu zersetzenden Material für den mikrobiellen Abbau werden durch die Bodenwasserverhältnisse geprägt (MONDINI et al. 2002). Ein positiver Zusammenhang zwischen Bodenfeuchte und mikrobieller Biomasse wurde in Auenböden gefunden (RINKLEBE 2004); in diesem Fall ist Bodenfeuchte der dominierende Faktor (siehe Abb. 3.6).

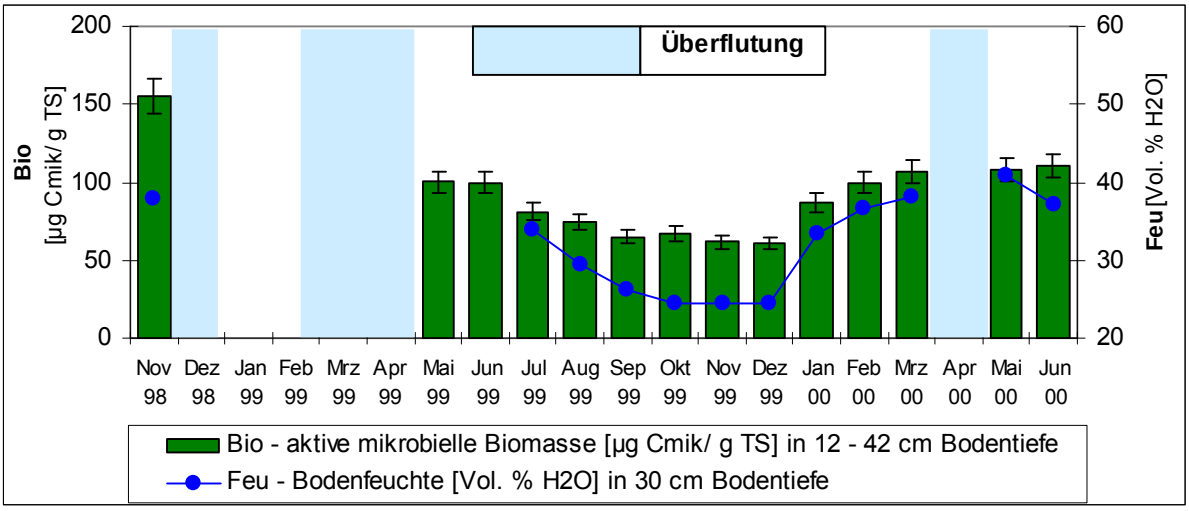


Abb. 3.6: Saisonale Dynamik der mikrobiellen Biomasse im aM-Horizont eines Vega-Gleys aus Auenschluffton in Abhängigkeit von der Bodenfeuchte (RINKLEBE 2004)

WILLIAMS & RICE (2007) untersuchten das Einwirken einer höheren Wasserverfügbarkeit auf die mikrobielle Bodengemeinschaft. Im Mittelpunkt ihrer Forschungen stand die Entwicklung bodenmikrobieller Kennwerte über einen Zeitraum von sieben Jahren in einem zur Trockenheit neigenden Boden. Die Ergebnisse zeigten, dass bei einer höheren Wasserverfügbarkeit die Biomasse von Pilzen und Bakterien stark anstieg. Das deutet darauf hin, dass der Umsatz von organischen Substraten durch die mikrobielle Gemeinschaft in durchgehend feuchten Böden bis zu einem bestimmten Wassergehalt größer ist.

Die mikrobielle Aktivität wird in humiden Regionen oft durch suboptimale Wasserpotentiale während der Wachstumszeit eingeschränkt (BORKEN & MATZNER 2009).

Das bodenspezifische Optimum der Bodenfeuchte für die Aktivität der Bodenorganismen liegt zwischen 60 und 80 % der Feldkapazität (MÜLLER JUN. & HICKISCH 1982; HICKISCH et al. 1984; MÜLLER 1985). Dieser Wert wird in trockenen Perioden vor allem in Sommer- und Herbstmonaten häufig nicht erreicht (MÜLLER et al. o.D.). Trockenstress führt zum Absterben von Bodenmikroorganismen (BORKEN & MATZNER 2009). Je länger die Trockenzeit andauert, desto größer ist die Menge der absterbenden mikrobiellen Biomasse (SCHIMEL et al. 1999).

Die aerobe bodenmikrobielle Aktivität sinkt, wenn Böden wassergesättigt sind oder die Wasserspannung sehr hohe Werte erreicht (ORCHARD & COOK 1983; ORCHARD et al. 1992; ZAK et al. 1999; ILSTEDT et al. 2000). Zeitgleich wird sich die Zusammensetzung der mikorobiellen Population hin zu fakultativ anaeroben bzw. anaeroben Bodenmikroorganismen verschieben; lange wassergesättigte Böden weisen generell eine geringere Pilzpopulation sowie eine geringere mikrobielle Biomasse als kurzzeitig überflutete Böden auf (RINKLEBE & LANGER 2006, 2008, 2010; LANGER & RINKLEBE 2009).

Fazit zum Einfluss der Bodenfeuchte:

Die Bodenfeuchte kontrolliert das qualitative und quantitative Auftreten von Bodenmikroorganismen, im Freiland jedoch überlagert sich häufig eine Vielzahl von Einflüssen. Fehlende bzw. unbeständige Korrelationen zwischen Bodenfeuchte und jahreszeitlicher Dynamik der Bodenmikroflora sowie bodenenzymatischer Aktivität sind u.a. in der Verfügbarkeit spezieller Substrate und deren Metabolite zu sehen. Andere Faktoren, wie der Lufthaushalt sowie die Substrat- und Wasserverfügbarkeit steuern die Bodenmikroflora und bodenenzymatische Aktivität zeitweise stärker als die Bodenfeuchte allein.

2. Temperatur

Die Bodentemperatur beeinflusst die Geschwindigkeit biochemischer Prozesse und damit sämtliche Stoffwechsel- und Wachstumsprozesse von Bodenorganismen. Seit den 1920er Jahren wurde berichtet, dass die Bodenatmung positiv mit der Temperatur korreliert (FEHER 1927). STEINWEG et al. (2008) analysierten die Auswirkungen von Temperaturänderungen auf die Effizienz der mikrobiellen Kohlenstoffumsetzung. Verschiedene Bodenproben wurden mit dem Substrat Cellubiose versetzt und nachfolgend bei unterschiedlicher Dauer und Temperatur inkubiert. Der Cellubiose-Abbau verlief bei höheren Temperaturen und längerer Inkubationsdauer bzw. Vorinkubation beschleunigt. Grundsätzlich ist ein vergleichbarer Effekt durch klimatisch bedingte, steigende Temperaturen zu erwarten.

Im Feldexperiment von BLUME & MÜLLER-THOMSEN (2007), in dem ein Temperaturanstieg von 1,5 – 2,5 °C im Oberboden von Küstenböden simuliert wurde, wurden Aus-

wirkungen auf bodenmikrobielle Kennwerte festgestellt. Für einen vom Klimawandel bedingten Temperaturanstieg wird eine Intensivierung der Aktivität von Bodenorganismen prognostiziert, wodurch die Akkumulation von Humus in den untersuchten Böden endete. Das Redoxpotential in Unterböden von hydromorphen Böden sinkt als Konsequenz der höheren Bodentemperaturen, was bei gleichem Bodenwassergehalt als ein Effekt einer ansteigenden Aktivität von anaeroben Bodenorganismen interpretiert werden kann. Das simulierte Ansteigen der Temperatur im Oberboden von ca. 2 °C hatte zur Folge, dass der mikrobiell verfügbare Kohlenstoff von 180 mg (kg Bodenmasse)$^{-1}$ auf 320 mg (kg Bodenmasse)$^{-1}$ anstieg.

FREY et al. (2008) beobachteten die Entwicklung der mikrobiellen Biomasse, deren funktionelle Leistung und Gemeinschaftsstruktur nach einer 12jährigen Erwärmung des Bodens unter Laubwald. Die permanente Erwärmung des Bodens (5 °C wärmer als die Umgebungstemperatur) führte dazu, dass sich die mikrobielle Biomasse stark reduzierte, verbunden mit einer Verringerung des Abbaus des Vorrates von C-Substraten, welcher Aminosäuren, Kohlenhydrate und Carbonsäuren beinhaltete. Die mikrobielle Biomasse nahm um ca. 25 % bis 45 % ab. Die niedrigen Werte der mikrobiellen Biomasse waren verbunden mit einer Reduzierung der labilen C-Gehalte auf den erwärmten Flächen. Im Durchschnitt war der Abbau der Kohlenhydrate, der Aminosäuren und die Carbonsäuren um 45 %, 41 % und 35 % auf den erwärmten Flächen reduziert. Die Bodenerwärmung führte weiterhin dazu, dass sich die Abundanz der Pilzorganismen verringerte. Es wurde eine Verschiebung der Bodenmikroorganismen in Richtung Gram-positive Bakterien und Actinomyceten festgestellt.

Bei höheren Jahresmitteltemperaturen ist die Basalatmung tendenziell erhöht und die C_{mik}/C_{org}-Quotienten erniedrigt; d.h. bei höheren Temperaturen und bei gleichem Substratangebot ist der Stoffumsatz durch die mikrobielle Biomasse erhöht (NLFB 2001).

Konträr hierzu hypothetisieren GRACE & RAYMENT (2000), dass sich die für die Kohlenstoffzersetzung im Boden verantwortlichen Mikroorganismen allmählich an die höheren Temperaturen anpassen würden. Die Folge wäre, dass das Kohlendioxid in nahezu konstanten, nicht in zunehmenden Raten freigesetzt werden würde (GRACE & RAYMENT 2000).

Nach SCHINNER & SONNLEITNER (1996) ist aufgrund der Temperaturreaktionen der Enzyme bei der Bodenerwärmung im Frühling eine erhöhte Abbaurate und dementsprechend ein Rückgang der Aktivität im Herbst bei Abkühlung zu erwarten. Enzyme sind für verschiedene biochemischen Prozesse (Stoffumsatz, Nährstoffkreislauf und Abbau von Xenobiotika) im Boden bedeutsam (ACOSTA-MARTÍNEZ et al. 2007). In einer Studie von TRASAR-CEPEDA et al. (2007) wurden die Auswirkungen der Temperatur auf verschiedene Enzyme in einem Grünlandboden untersucht. Die Temperaturabhängigkeit der Substrathydrolyserate variiert in Abhängigkeit vom Enzym. Die Temperatur übt einen großen Effekt auf die Aktivität von Oxidoreduktasen aus. Die Reaktionsprodukte, die durch die Dehydrogenase entstehen, steigen mit der Erhöhung der Temperatur an. Das Enzym Katalase wurde bei Temperaturen über 37 °C nicht beeinflusst. ABRAMYAN (1993) hingegen ermittelte negative Beziehungen zwischen der Bodentemperatur und Bodenenzymaktivitäten von Invertase, Phosphatase, Urease, Arylsulfatase, ATPase und Dehydrogenase; lediglich das Enzym Katalase zeigte zur Temperatur einen positiven Zusammenhang.

Austrocknung von Böden reduziert die Mobilität von extrazellulären Enzymen, da der diffuse Transport aufgrund des Absinkens des Wasserpotentials und der verminderten Mächtigkeit des Wasserfilms verringert wird (BORKEN & MATZNER, 2009).

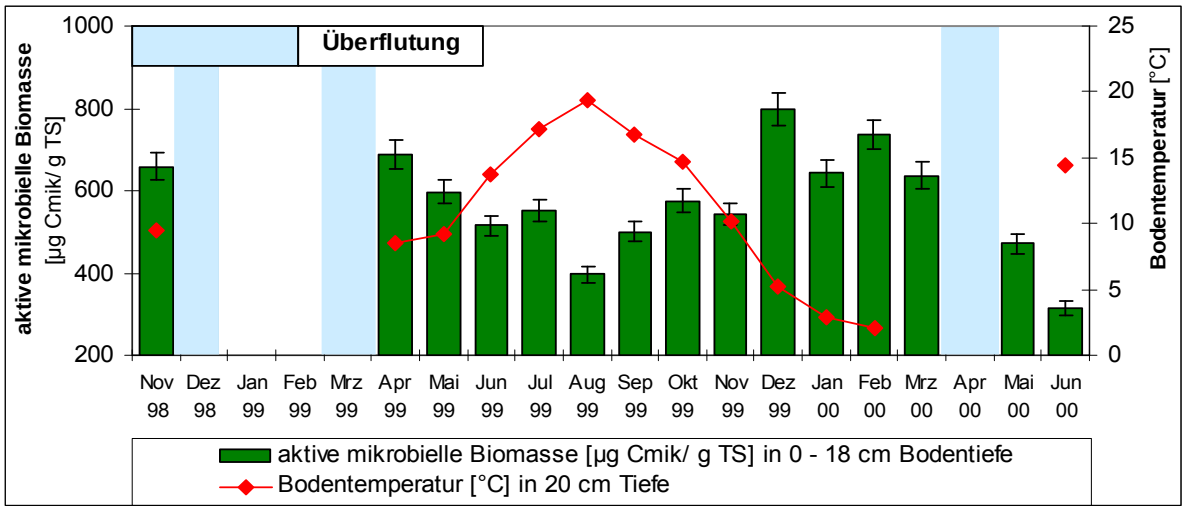


Abb. 3.7: Saisonale Dynamik der mikrobiellen Biomasse im aAh-Horizont einer Vega aus Auensandlehm in Abhängigkeit von der Bodentemperatur (RINKLEBE 2004)

Die jahreszeitliche Dynamik der mikrobiellen Biomasse zeigte in einem Auenboden einen gegenläufigen Zusammenhang zur Bodentemperatur (siehe Abb. 3.7), da in diesem Boden der durch die Temperatur beeinflusste Wassergehalt der entscheidende Faktor war (RINKLEBE 2004). Die mikrobielle Biomasse kann folglich, trotz eines Temperaturoptimums, bei nicht ausreichendem mikrobiell verfügbarem Wasser abnehmen (RINKLEBE 2004).

Fazit zum Einfluss der Bodentemperatur:

Fehlende oder negative Korrelationen zwischen Bodentemperatur und bodenmikrobiellen Kennwerten sind meist darin begründet, dass die Temperatur das bodenmikrobielle Wachstum in unseren Breiten häufig nicht limitiert. Die Temperatur allein ist mitunter im Freiland ein nur untergeordnet bodenmikrobiell steuernder Faktor. Das heißt solange eine zu hohe oder zu niedrige Temperatur nicht direkt durch Hitze oder Frost mikrobielle Zellen schädigt, wirken andere Umwelteinflüsse, wie Substratangebot (z.B. gelöste organische Substanzen), Bodenfeuchte, Wasserspannung und Lufthaushalt stärker als die Bodentemperatur auf bodenmikrobielle Kennwerte ein. Diese Interaktionen sind populations- und enzymspezifisch sowie zeitabhängig. Außerdem sind Bodenmikroorganismen an die jeweiligen Standortsbedingungen adaptiert.

3. Hydrothermales Regime

Änderungen des Bodenwasserhaushaltes und der Temperatur beeinflussen sich wechselseitig. Eine isolierte Betrachtung eines einzelnen Parameters wird die natürlichen Gegebenheiten nur in seltenen Fällen widerspiegeln. Auswirkungen der Klimaveränderungen auf die Bodenmikrobiologie sollten deshalb anhand des hydrothermalen Regimes beurteilt werden (FEHER & FRANK 1937; PAUL & CLARK 1996). Die Kombination aus Bodenwasserhaushalt und Temperatur ist für die Aktivität der Bodenmikroorganismen eine entscheidende Einflussgröße. Das hydrothermale Regime beeinflusst das qualitative und quantitative Auftreten von Bodenmikroorganismen und ist unter den ökologischen Faktoren der wichtigste Regulator des bodenenzymatischen Potentials. Abbildung 3.8 verdeutlicht, dass eine alleinige Messung der Temperatur oder der Feuchte oft nicht hinreichend aussagekräftig ist, wie auch zahlreiche Studien belegen (z.B. KHAZIYEY 1977; INSAM 1990; ABRAMYAN 1993, RINKLEBE 2004). Für Niedersach-

sen könnte der Klimawandel beispielsweise zu einer Zunahme der Mineralisation durch höhere Temperaturen im Herbst/Winter und einer Abnahme durch Wasserüberschuss im Winter führen (LBEG 2009).

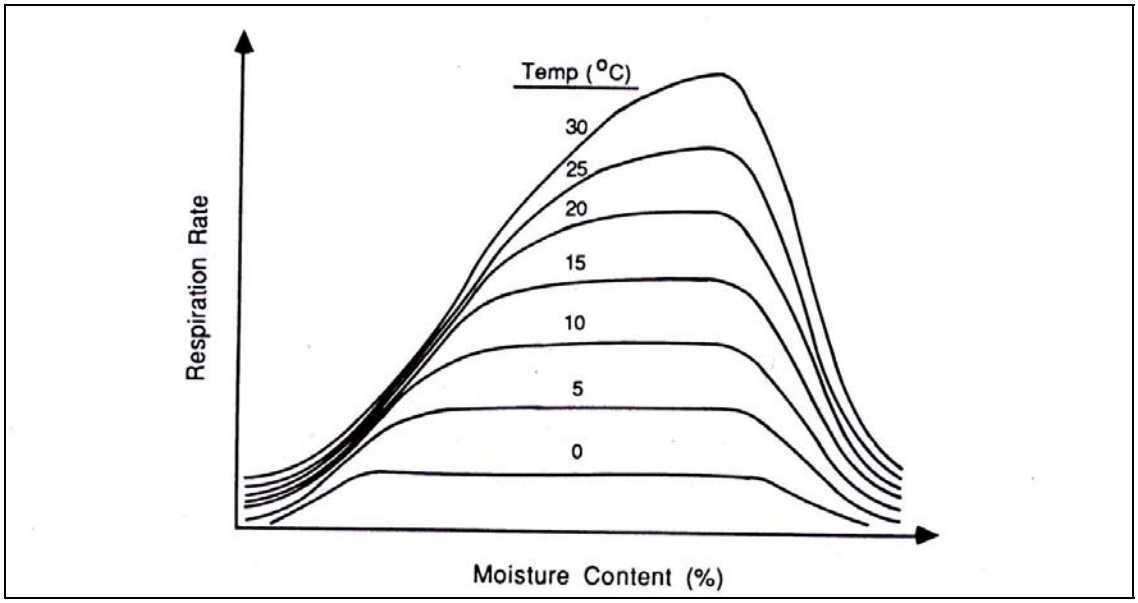


Abb. 3.8: Bodenatmungsrate bei verschiedenen Temperaturen und Bodenfeuchten (PAUL & CLARK 1996)

Saisonale Änderungen der mikrobiellen Population und Aktivität sowie der Nährstoffverfügbarkeit im Freiland resultieren aus Änderungen von verschiedenen Bodeneigenschaften und sind daher sehr komplex. Die Jahreszeit kann mit ihren steuernden Faktoren Temperatur und Feuchte stärker die mikrobielle Population beeinflussen als weitere bekannte Einflussgrößen wie der pH-Wert oder die Nährstoffverfügbarkeit (DÍAZ-RAVIÑA et al. 1993).

Erhöhte Jahresmitteltemperaturen bewirken bei vergleichbaren Bodenwassergehalten meist eine Erhöhung der biologischen Aktivität. Diese bewirkt eine Erhöhung der Mineralisation, wodurch es Abnahme von C-Vorräten kommen kann (siehe Kap. 3.3.3). Der entgegengesetzte Prozess findet statt, wenn die Bodenfeuchte in Zeiten ausgeprägter Trockenheit gering ist. Die mikrobielle Aktivität wird dann aufgrund des geringen Wassergehaltes trotz steigender Temperaturen abnehmen (siehe Abb. 3.7). Durch die sich

verändernde Mikroorganismenpopulation in Böden können sich die Stoffumsatzbedingungen verändern (LFU 2007).

Eine positive klimatische Wasserbilanz, d.h. ein Wasserüberschuss und damit im Mittel eine höhere Bodenfeuchte, bewirkt bei ähnlichen Bodeneigenschaften tendenziell eine niedrige Basalatmung und einen niedrigen C_{mik}/C_{org}-Quotienten (NLFB 2001).

Fazit zum Einfluss des hydrothermalen Regimes:

Die mikrobielle Biomasse erreicht in unseren Breiten aufgrund der jahreszeitlich bedingten Einflüsse oft im Frühjahr oder Herbst ihre maximalen Werte. Vor allem im oberflächennahen Boden sind Bodenmikroorganismen starken Variationen der Temperatur und Feuchte ausgesetzt. Bereits FEHER & FRANK (1937) quantifizierten den Einfluss von Temperatur und Wassergehalt auf Bodenmikroorganismen in Laborexperimenten. Der abschließende Nachweis im Freiland konnte bisher nur teilweise erbracht werden, da vermutlich der Bodenstoffhaushalt und weitere Faktoren Bodenmikroorganismen beeinflussen.

4. Stoffhaushalt

Die im Boden vorhandenen Stoffe sind neben dem hydrothermalen Regime ebenfalls zu berücksichtigen, denn die Menge und Verfügbarkeit von Nähr- und Schadstoffen kann die Populationsgröße und Aktivität von Bodenmikroorganismen beeinflussen. Die mikrobielle Aktivität wird neben Temperatur und Bodenwassergehalt maßgeblich durch Nährstoffflüsse beeinflusst, welche nicht zwingend an den jahreszeitlichen Verlauf gekoppelt sein müssen (WARDLE 1998). Dem gelösten organischen Kohlenstoff (DOC) kommt hierbei eine herausragende Bedeutung zu.

Der DOC ist die mobilste Fraktion der organischen Substanz in der Bodenlösung und im Grundwasser (ZSOLNAY 1996). Humus, Streuabbauprodukte und deren Auswaschungen, bodenmikrobielle Abbauprodukte sowie Wurzelexudate werden als Hauptquellen für den DOC angesehen (ZSOLNAY 1996; KALBITZ et al. 2000). DOC wird von Bodenmikroorganismen als Substrat genutzt (MARSCHNER & BREDOW 2002). BOYER

und GROFFMAN (1996) schlagen vor, den DOC als Indikator für den bodenmikrobiell verfügbaren Kohlenstoff zu nutzen.

Prinzipiell erhöht sich die DOC-Auswaschung, wenn trockener Boden wieder durchfeuchtet wird (LUNDQUIST et al. 1999; KAISER et al. 2001). Ein häufiger Wechsel von Nass- und Trockenphasen trägt zu höheren DOC-Hintergrundkonzentrationen bei (LUNDQUIST et al. 1999).

Geringe Gehalte an abbaubarem organischen Material können negative Auswirkungen auf die mikrobielle Aktivität haben (MONDINI et al. 2002; KIRSCHBAUM 2006).

Die zeitlichen Variationen der mikrobiellen Biomasse werden vom Makroklima und von Bodeneigenschaften reguliert (WARDLE 1998; GÄRDENÄS 2000). Die kombinierte Wirkung von Bodenfeuchte, Bodentemperatur und gelöstem organischen Kohlenstoff erklärte in Auenböden den höchsten Anteil der zeitlichen Variabilität an bodenmikrobiellen Kennwerten (RINKLEBE 2004).

Fazit zum Einfluss des Stoffhaushalts:

Nährsubstrate, Wassergehalt und -spannung, Bodentemperatur sowie Lufthaushalt und Bodentiefe wirken einzeln sowie in vielfältiger Kombination als komplexe Faktoren auf Bodenmikroorganismen ein und können diese je nach Höhe und Zusammensetzung des Wechselspiels der Faktoren stimulieren oder inhibieren.

Auswirkungen auf die Bodenfunktionen:

Die erwarteten Klimaveränderungen werden den Wasser- und Temperaturhaushalt der Böden beeinflussen. Diese prognostizierten Veränderungen werden über das hydrothermale Regime die Populationsgröße, -zusammensetzung sowie die Aktivität von Bodenmikroorganismen beeinflussen. Je nach Ausprägung, Standort und Region können die veränderten Temperatur- und Wasserverhältnisse positiv oder negativ auf Bodenmikroorganismen und ihren Stoffumsatz wirken. Die sich direkt oder indirekt durch den Klimawandel ändernden Stoffhaushalte nehmen ebenfalls Einfluss auf die Bodenmikroorganismen. Die Klimaveränderung führt außerdem, über die Veränderungen der mikrobiellen Aktivität und daran gekoppelt der Stoffhaushalte zu Beeinträchtigungen der *Regelungsfunktion* von Böden. Die durch mikrobiologische Prozesse gesteuerte

und vom Klimawandel beeinflusste Mineralisierung kann wiederum Auswirkungen auf die Nährstoffverfügbarkeit und somit die *Nutzungsfunktion* von Böden ausüben.

Rückkopplungseffekte durch veränderte mikrobielle Aktivitäten sind zu erwarten, da sie den Bodenstoffhaushalt beeinflussen und umgekehrt. Hierbei sind insbesondere die bioverfügbaren Stoffmengen bedeutsam.

Datenbedarf, Datenangebot und Dateneignung

Die mikrobielle Biomasse ist ein geeigneter Indikator für Änderungen von Nutzungs- und Umwelteinflüssen, da sie schneller als andere Bodenparameter wie z.B. der Humusgehalt reagiert (JÖRGENSEN 1995). Die mikrobielle Biomasse kann neben Reaktionen auf das hydrothermale Regime auch eine Sensibilität gegenüber der Kohlenstoffzufuhr, auf das Vorhandensein von Schadstoffen sowie auf Bodenverdichtung anzeigen (POWLSON & JENKINSON 1981; HARDEN et al. 1993; CHANDLER & BROOKES 1991; KAISER 1992).

Die Basalatmung (BA) (oder auch Grundatmung) wird herangezogen, um die Aktivität der mikrobiellen Biomasse zu bestimmen. Die Bodenorganismen veratmen zur Erzeugung von Energie eine bestimmte messbare Menge an Kohlenstoff unter O_2-Verbrauch und setzen dabei CO_2 frei. Die Basalatmung kann unter definierten Bedingungen zur Kennzeichnung des physiologischen Zustandes von Mikroorganismen verwendet werden. Die Basalatmung steht für den Basis-Energiebedarf der mikrobiellen Biomasse, d.h. der Menge an Energie, die zur Aufrechterhaltung lebensnotwendiger Körperfunktion benötigt wird, ohne dass die mikrobielle Biomasse zunimmt (NLFB 2001).

Um die mikrobielle Biomasse direkt zu bestimmen, muss eine Zählung unter dem Mikroskop durchgeführt werden. Indirekt kann die mikrobielle Biomasse über universelle Indexsubstanzen (z.B. C_{mik} oder ATP) bestimmt werden (SCHLICHTING et al. 1995). Die direkte Zählung ist sehr aufwändig, weshalb häufig auf Indexsubstanzen zurückgegriffen wird. Generell ist dabei zu beachten, dass es sich bei Parametern wie der mikrobiellen Biomasse und der Bodenatmung um Summenparameter handelt.

Um bundesweite Aussagen treffen zu können, muss je nach Bundesland detailliert geprüft werden, welche Daten vorhanden sind und inwiefern sie für klimarelevante Fragestellungen verwendet und ausgewertet werden können. Anhand des Datenangebotes und der Eignung vorliegender Daten können die Daten identifiziert werden, welche zu aussagekräftigen Analysen notwendig sind.

Bodenmikrobiologische Parameter werden zurzeit in verschiedener Intensität und unterschiedlichem Umfang in den einzelnen Bundesländern gemessen. Falls bodenmikrobiologische Kennwerte erhoben werden, dann sollen die nach BARTH et al. (2001) obligaten Parameter gemessen werden. Die untersuchten fakultativen Parameter variieren je nach Bundesland; teilweise werden zusätzlich auch andere als in Tabelle 3.24 angegebene Parameter gemessen (z.B. Dehydrogenaseaktivität, Leuchtbakterientest). Zeitreihen von mehr als 10 Jahren liegen nur selten vor. Mittels der Basis-BDF-Daten sind Aussagen zu Veränderungen der mikrobiellen Bodenbiomasse und Bodenenzymen möglich, dies ist optimal, wenn Bodentemperatur und Wassergehalt simultan mit erfasst werden.

Die Untersuchungen der Boden-Dauerbeobachtung (Basis- und Intensiv BDF) liefern eine große Menge an Informationen zur Beobachtung von Bodenveränderungen durch das Klima. Die Basisstandorte der Boden-Dauerbeobachtung (Basis-BDF) werden in regelmäßigen Abständen untersucht, um Veränderungen des Bodenzustands zu diagnostizieren. An den Messstellen der Basis-BDF werden folgende bodenmikrobiologische Parameter in vorgegebenen Intervallen bestimmt (Tab. 3.24).

An den Intensiv-BDF werden in der Regel keine zusätzlichen bodenmikrobiologischen Untersuchungen durchgeführt.

Im Rahmen der landwirtschaftlichen Dauerfeldversuche wurden durch einige Einrichtungen auch mikrobiologische Parameter (teilweise einmalig) erhoben. Für einzelne spezielle Standorte könnten hierzu geeignete Daten vorliegen, dies sollt jedoch detailliert im Einzelfall überprüft werden.

Feldlysimeter-Dauerversuche bieten keine standardmäßig erhobenen mikrobiologischen Parameter. An Einzelstandorten wurden jedoch Parameter wie z.B. die Bodenatmung oder die Bakterienzahl erhoben.

Tab. 3.24: Derzeit zu messende obligate und empfohlene (kursiv) mikrobiologische Parameter (nach BARTH et al. 2001).

Parameter (Quellen: UBA, BARTH et al 2001)	Untersuchungshäufigkeit nach BARTH et al.
Biomasse	≥ 1 Jahr (jährlich auf Acker, zweijährig auf Gründland, dreijährig im Forst)
Basalatmung	
Metabolischer Quotient	
N-Mineralisation	*1 Jahr*
Zelluloseabbau	
Arginin-Ammonifikation	
Arylsulfataseaktivität	
β-Glucosidaseaktivität	
Katalaseaktivität	

Die Daten, die an den Messstationen der Projekte ICP Forest Level I / BZE und II, UPB (Probenart Boden) sowie Bodenschätzung ermittelt werden, sind nicht direkt zur Untersuchung der Veränderungen der Bodenmikrobiologie durch den Klimawandel geeignet, da hier keine mikrobiologischen Untersuchungen stattfinden. Allerdings können diese Daten ergänzend bspw. zur näheren Charakterisierung der Standorte herangezogen werden.

Fazit zur Eignung und Aussagekraft sowie der räumlichen Verteilung:

Die Daten der Boden-Dauerbeobachtung liefern in einigen Bundesländern einen umfangreichen Datensatz an mikrobiologischen Informationen. Die räumliche Aussagekraft der Daten verschiedener Parameter kann derzeit nur schwer abgeschätzt werden, da einige im BDF-Programm lediglich als `empfohlen` (siehe Tab. 3.24) und nicht als `obligat` eingestuft sind. Daten der mikrobiellen Biomasse und der Basalatmung liegen aber häufig im deutschen Bundesgebiet vor. Dieser Datenpool könnte um die oben genannten Untersuchungen der Feldversuche und Lysimeteranlagen ergänzt werden.

Damit liegt ein länderübergreifender Datensatz, allerdings in heterogener zeitlicher Auflösung und Dauer vor. Inwieweit dieser für klimatologische Fragestellungen als repräsentativ betrachtet werden kann, sollte in naher Zukunft umfassend und detailliert geprüft werden. Hier ist vor allem zu beachten, ob für die Fragestellungen angemesse-

ne Begleitparameter (Bodentemperatur, Wassergehalt, Luft- und Nährstoffhaushalt u.a.) vorliegen. Das Messintervall von ≥ 1 Jahr auf den Flächen der Boden-Dauerbeobachtung ist für verschiedene Fragestellungen (z.B. saisonale klimabedingte Änderungen) nicht ausreichend.

Möglich sind derzeit qualitative Aussagen zur Veränderung der bodenmikrobiellen Stoffumsatzleistungen:

→ Frühwarnsystem für Beeinträchtigungen der Lebensraumfunktion oder Veränderung der Biodiversität von Böden

→ Berücksichtigung der Leistungen der Bodenmikroorganismen für Anpassungsstrategie an den Klimawandel

Bisher nicht möglich sind Modellierungen, d.h. Aussagen für Regionen, für die BDF-Untersuchungen fehlen, sind nur sehr eingeschränkt möglich.

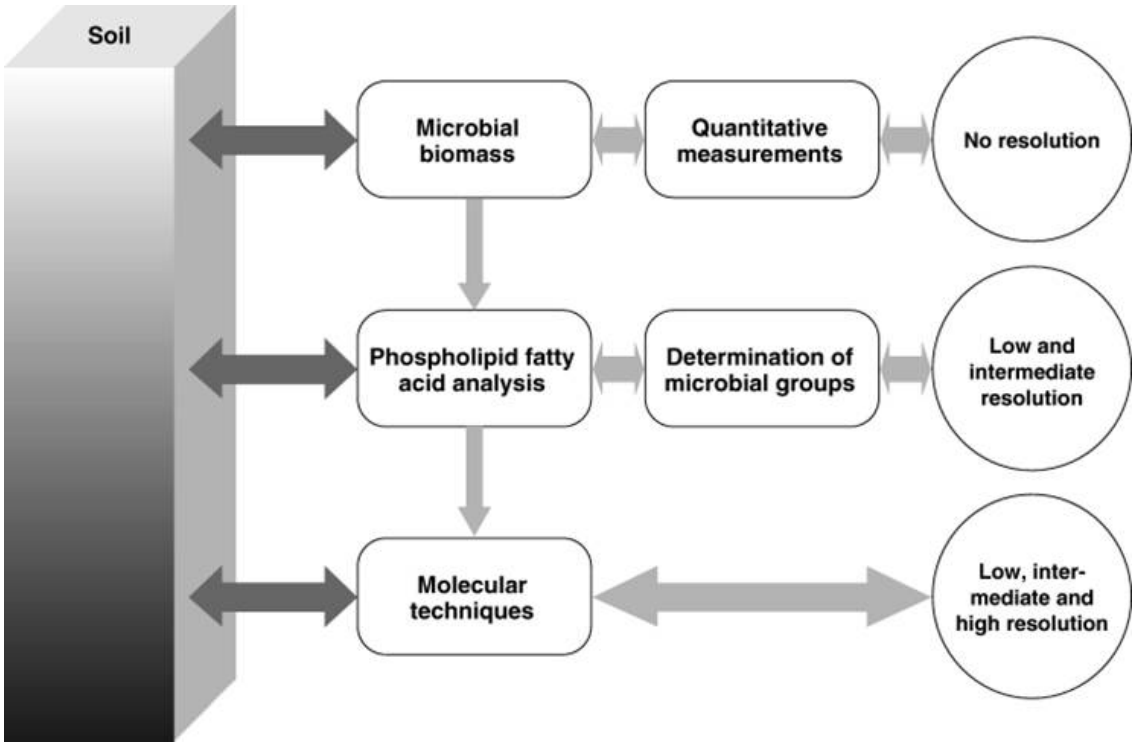


Abb. 3.9: Bodenmikrobiologische Methoden (aus: NANNIPIERI et al. 2003: Microbial diversity and soil functions. European Journal of Soil Science. 54. 655-670)

Empfehlungen für künftige(s) Monitoring und Erhebungen

- Mikrobielle Kennwerte sollten den mikrobiellen Bodenzustand und die mikrobiell verursachten Stoffumsatzleistungen in Böden (C, N, P, S-Haushalt) adäquat abbilden, um als Indikatoren fungieren zu können. Des Weiteren sollten sie praktikabel und möglichst einfach bundesweit ermittelt werden können. Nach NLFB (2001) sollten bodenbiologische Verfahren folgende Anforderungen erfüllen:

  Allgemeine Anforderungen

  - direkte Beziehungen zur Bodenfunktion, die bewertet werden soll
  - Indikator sollte sensitiv auf potenziell schädliche Bodenveränderungen reagieren
  - eine Indikation der Einflüsse von Landnutzung und Bewirtschaftungspraxis sollte möglich sein

  Technische Anforderungen

  - reproduzierbare Ergebnisse
  - generell akzeptierte und häufig eingesetzte, standardisierte Methode (z.B. ISO-DIN Standard)
  - kostengünstige Methode
  - Verfügbarkeit von Referenzwerten zur Bewertung der Ergebnisse
  - ökologische Bewertung der Ergebnisse sollte möglich sein

- Zur Charakterisierung des bodenmikrobiellen Zustandes werden heute zum großen Teil indirekte Messmethoden, hauptsächlich physiologische Verfahren angewendet. Durch diese Methoden werden sowohl funktionelle bodenmikrobiologische Parameter als auch ökophysiologische (oft abgeleitete) Kennwerte (z.B. qCO_2, C_{mic}/C_{org}) ermittelt. Die spezifische Stoffwechselleistung der Bodenmikroorganismen wird häufig unter definierten und standardisierten Bedingungen erfasst. In der Wissenschaft finden derzeit zahlreiche bodenmikrobiologische Methoden Anwendung. Insbesondere sind die direkte Zählung (Mikroskopie), Keimtest (Plattengutverfahren), Chloroform Fumigation Inkubation (CFI), Chloroform Fumigation Extraktion (CFE), Substrat-induzierte Respiration (SIR), Adenosintriphosphat (ATP),

Phospholipid Fatty Acid (PLFA)-Analysen und diverse Bodenenzymaktivitäten zu nennen. In den vergangenen Jahren werden in der bodenmikrobiellen Forschung zunehmend molekularbiologische Methoden, wie z.B. DGGE-Profile, PCR-Analyse (Polymerase-Kettenreaktion), Nukleinsäure-Analysen (DNA, RNA), Bakterielles Murein, Enzyme-linked Immunosorbent, Assays (ELISA), u.v.a.m. eingesetzt. Trotz ihrer teilweise hohen Auflösung (siehe Abbildung 3.9), ermöglichen sie jedoch keine oder eine nur unzureichende quantitative Erfassung bodenmikrobieller Aktivitäten und Stoffumsatzleistzungen. Außerdem sind sie derzeit noch nicht robust genug. Daher sind diese Methoden für einen bundesweiten Einsatz in der Bodendauerbeobachtung derzeit standardmäßig (noch) nicht geeignet.

- Klimabedingte Veränderungen der bodenmikrobiellen Aktivität können durch die mikrobielle Bodenbiomasse und Bodenenzymaktivitätsmessungen aus den jeweiligen Stoffkreisläufen abgebildet werden. Sie können als geeignete Indikatoren für Änderungen von Nutzungs- und Umwelteinflüssen fungieren, da sie schneller als andere Bodenparameter, wie z.B. der Humusgehalt, reagieren. Um die Struktur von bodenmikrobiellen Lebensgemeinschaften und ihre potentiellen Änderungen adäquat zu erfassen könnten sichzukünftig Messungen von Phospholipidfettsäuren (Phospholipid Fatty Acid, PLFA) als Biomarker für diverse Bodenorganismengruppen anbieten.

<u>Fazit:</u>

Die Messung der mikrobiellen Biomasse und der daraus abgeleiteten ökophysiologischen Parameter (qCO_2, C_{mic}/C_{org} etc.) sowie die Messung von Bodenenzymen sind derzeit die geeigneten Methoden, um bodenmikrobielle Veränderungen im Rahmen der Boden-Dauerbeobachtung zu detektieren. Zukünftig bieten sich Messungen von Phospholipidfettsäuren (Phospholipid Fatty Acid, PLFA) als Biomarker für verschiedene Bodenorganismengruppen zur Charakterisierung der Struktur bodenmikrobieller Lebensgemeinschaften (Bodenbiodiversität) an.

Bodenmikroorganismen reagieren jedoch aufeine Vielzahl von Einflüssen und Faktoren. Die gemessenen bodenmikrobiologischen Parameter können im Hinblick auf Klimaveränderungen insbesondere dann sachgerecht interpretiert werden, wenn weitere Parameter parallel gemessen werden. Insbesondere betrifft dies:

- Bodentemperatur
- Bodenfeuchte / -wassergehalt
- Grundwasserflurabstand
- Organische Bodensubstanz (OBS)
- Gelöste organische Substanz (DOC)
- (bioverfügbare) Nährstoffkonzentrationen
- (bioverfügbare) Schadstoffkonzentrationen
- Lagerungsdichte

Fazit:

Neben der Messung der mikrobiellen Biomasse und der hieraus abgeleiteten ökophysiologischen Parameter (qCO_2, C_{mic}/C_{org} etc.) sowie von Bodenenzymen aus den C, N, P und S-Kreisläufen sowie von Phospholipidfettsäuren (Phospholipid Fatty Acid, PLFA) sollte zukünftig der multifaktorielle Einfluss der bodenmikrobiell steuernden Faktoren Bodenfeuchte, Wasserspannung, Bodentemperatur sowie Nährstoffhaushalt simultan mit erfasst werden.

Handlungserfordernisse für das Klimafolgenmonitoring:

- Messung der mikrobiellen Bodenbiomasse (C_{mic}) inklusive abgeleiteter Kennwerte (qCO_2, C_{mic}/C_{org} etc.) *und* von Bodenenzymaktivitäten aus den C, N, P und S-Kreisläufen auf den BDF der Bundesländer (ggf. Auswahl)
- Messung von Phospholipidfettsäuren (Phospholipid Fatty Acid, PLFA) zur Charakterisierung der Struktur von bodenmikrobiellen Lebensgemeinschaften sowie der bodenmikrobiellen Biodiversität

Zur treffgenaueren Erfassung von saisonalen Schwankungen bodenmikrobiologischer Kennwerte aufgrund des Klimawandels sind kürzere Messabschnitte für die mikrobiologische Kennwerte notwendig:

- Intensivierung der Beprobungs- und Messintervalle (mindestens monatliche Auflösung); parallel dazu Messung von:

  - Boden- und Lufttemperatur
  - Bodenwassergehalt & Grundwasserflurabstand
  - Organische Bodensubstanz (OBS) / Gelöste organische Substanz (DOC)
  - (bioverfügbare) Nährstoff- Schadstoffkonzentrationen
- Entwicklung nachvollziehbarer Methoden zur Übertragbarkeit bodenmikrobieller Aussagen in die Fläche über Verknüpfung mit flächenhaft dokumentierten Bodeneigenschaften.
- Fortlaufende Dokumentation der Bewirtschaftungsmaßnahmen auf allen BDF (nicht nur Ackerflächen)
- Fortsetzung, Intensivierung und Erweiterung der bodenmikrobiologischen Erhebungen auf bereits untersuchten BDF, da nur über Zeitreihen Veränderungstendenzen diagnostizierbar sind.

3.3.5 Bodenzoologie

A. Beylich; U. Graefe

Vorbemerkung

Die in Kapitel 1 skizzierten erwarteten klimatischen Veränderungen in Deutschland führen im Lebensraum Boden – regional in unterschiedlichem Maß – unter anderem zu folgenden Veränderungen:

- Höhere Bodentemperaturen, kürzere Frostperioden
- Austrocknung des Bodens (insbesondere im Sommer)
- Entstehung von Staunässe (auch in Abhängigkeit von der Bewirtschaftung)
- Veränderungen bodenphysikalischer und bodenchemischer Eigenschaften, z.B. pH-Wert, Redoxpotential, Mobilität von Schadstoffen.

Bodenzoologische Monitoringdaten lassen sich erstens daraufhin überprüfen, ob bereits klimabedingt Veränderungen der Bodenfauna erfolgt sind. Zweitens können diese

Daten unter Einbeziehung von Daten zu abiotischen Bodeneigenschaften herangezogen werden, um mögliche Auswirkungen von Klimaveränderungen auf die Bodenfauna für verschiedene Klimaszenarien abzuschätzen. Wir gehen davon aus, dass die Veränderung des Klimas sich als Verschiebung von Klimazonen beschreiben lässt. Die zu erwartenden Veränderungen der Böden und der in ihnen ablaufenden Prozesse lassen sich deshalb zumindest teilweise durch das Studium der Verhältnisse in Gebieten abschätzen, deren Klima heute dem bei uns erwarteten entspricht. Die Entwicklung von bisher nicht bekannten Klimakonstellationen scheint jedoch ebenfalls denkbar.

Klimaänderungen und Wirkungsprognose

Bodenorganismen sind an ein bestimmtes Klima angepasst. Klimaänderungen wirken sich daher auf die Artenzusammensetzung der Bodenlebensgemeinschaft aus. Stark vereinfacht lässt sich die Klimaabhängigkeit von Arten aus den Klimaparametern ihres Verbreitungsareals ableiten und in Form von Ökogrammen darstellen (siehe Abb. 3.10). Für die Darstellung der Klimaabhängigkeit einer Art in Form von Ökogrammen werden Informationen benötigt hinsichtlich der für die Art wesentlichen Klimaparameter und ihrer Toleranzgrenzen bezüglich dieser Parameter. Die Toleranzgrenzen ergeben sich hauptsächlich aus dem Verbreitungsgebiet der Art in Zusammenhang mit den jeweils herrschenden Klima- und Bodenbedingungen. Aus der Verknüpfung der Toleranzgrenzen von Arten mit den in verschiedenen Klimaszenarien postulierten klimatischen Veränderungen ergeben sich potenzielle Verbreitungsarealverschiebungen der Arten. Inwieweit geeignete neue Areale tatsächlich auch besiedelt werden, hängt von der Ausbreitungsgeschwindigkeit der Arten ab (MUSTIN et al. 2009). Dafür spielen u.a. Landnutzung und menschlicher Einfluss eine Rolle. Der Klimawandel beeinträchtigt also nicht die Lebensraumfunktion des Bodens grundsätzlich, sondern verändert die Lebensbedingungen an einem Standort derart, dass sich langfristig eine andere, standorttypische Bodenlebensgemeinschaft dort entwickeln wird.

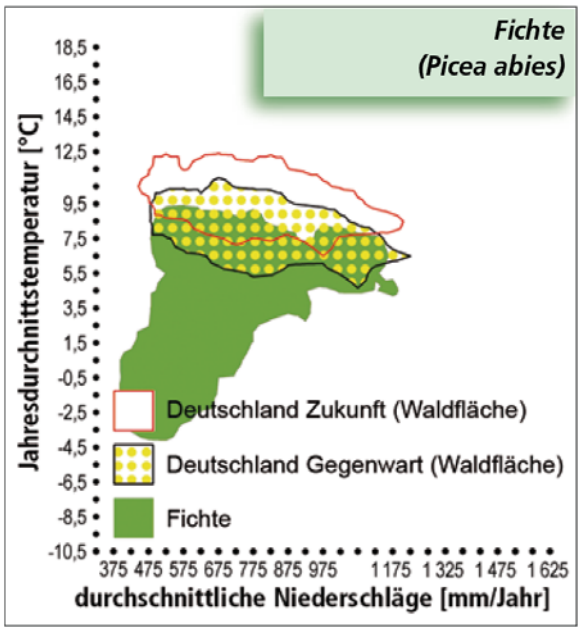


Abb. 3.10: Klima-Ökogramm der Fichte (aus KÖLLING 2007).
Für Bodenorganismen liegen derartige Diagramme bisher nicht vor.

Verschiebungen von Artenarealen bedeutet zum Beispiel: Wärmeliebende und/oder trockenheitstolerante Arten wandern ein oder breiten sich aus, kälte- und nässeliebende Arten verschwinden oder werden zurückgedrängt. Klimaänderungen wirken sich also auch auf die absolute und relative Häufigkeit der Arten der Bodenlebensgemeinschaft aus. Damit verändern sich die Konkurrenzverhältnisse innerhalb von Bodenlebensgemeinschaften. Inwieweit Artenschwund durch Einwanderung von Arten kompensiert oder sogar überkompensiert wird, wird regional unterschiedlich sein und hängt auch von der betrachteten Zeitskala ab. Da die Arten unterschiedlich schnell reagieren, kommt es zur Ver- oder Entmischung von typischen Lebensgemeinschaften (RAMMERT 2005). Dadurch kann es zur Entkoppelung von Nahrungsbeziehungen, Stoff- und Energieflüssen kommen (JESSEL 2009). Mit Veränderung der Bodenlebensgemeinschaft werden sich daher die von ihr erbrachten Ökosystem-Dienstleistungen verändern und damit deren Beitrag zu Wasser- und Nährstoffkreislauf im Boden.

Die Reaktionen der Bodenorganismen auf Klimaänderungen sind u.a. abhängig von ihrer Körpergröße und ihrem Regenerationsverhalten. Es wurden verschiedene Strategien entwickelt, um mit im Jahresverlauf stark schwankenden Temperaturen und

Feuchteverhältnissen zurechtzukommen. Welche Strategie umgesetzt wird, ist auch innerhalb einer Tiergruppe artspezifisch verschieden.

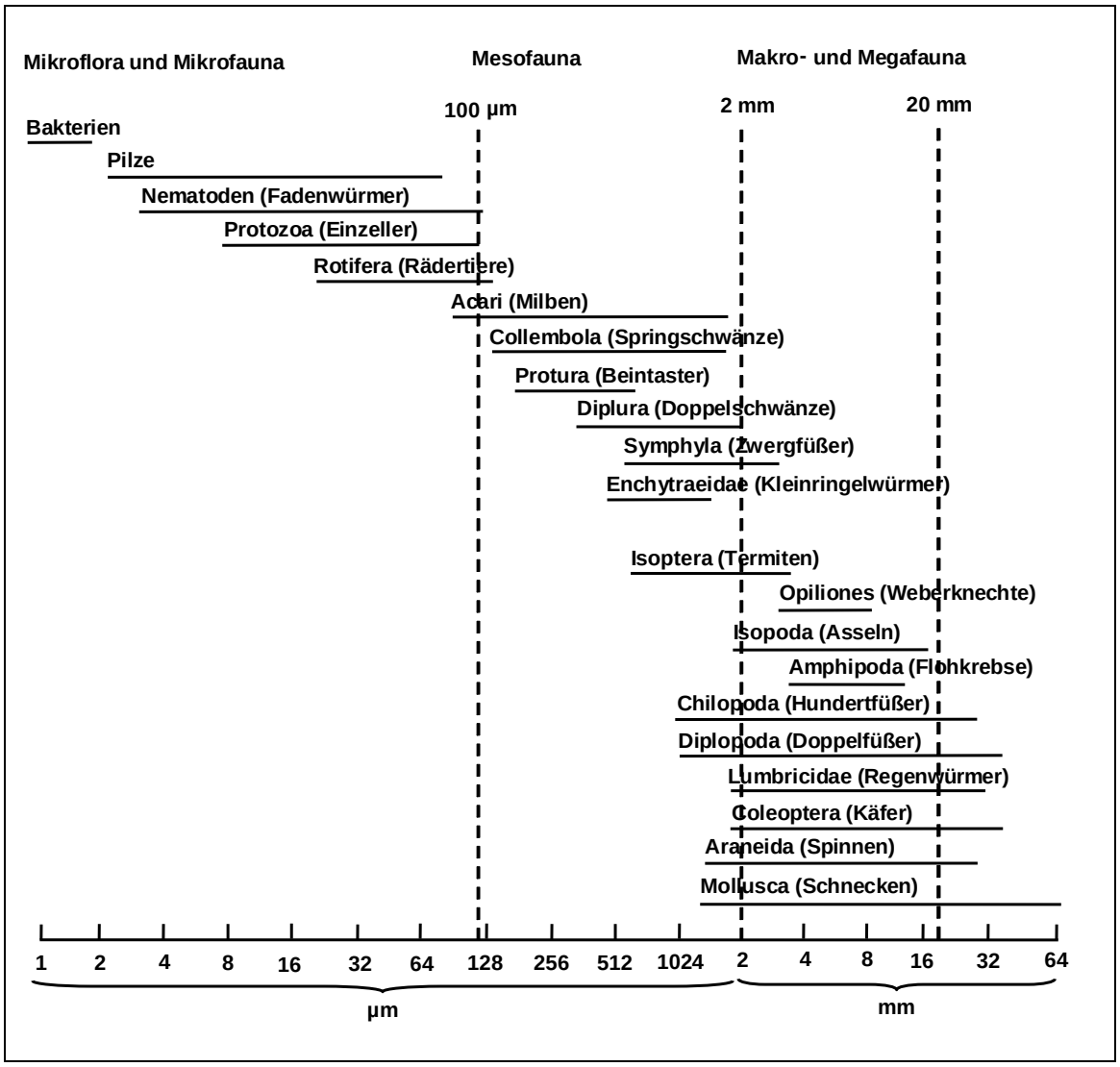


Abb. 3.11: Größenklassen der Bodenorganismen bezogen auf den Durchmesser der Organismen (nach SWIFT et al. 1979)

Die Bodenlebensgemeinschaft ist wegen ihrer Diversität nicht annähernd vollständig erfassbar. Der Systemzustand der Bodenlebensgemeinschaft lässt sich aber anhand von Indikatorgruppen aufzeigen. Regenwürmer sind Schlüsselorganismen der Bodenlebensgemeinschaft und prioritäre Indikatorgruppe für die Makrofauna (siehe Abb. 3.11). Sie haben beträchtlichen Einfluss auf Bodeneigenschaften. Umgekehrt

reagieren sie empfindlich auf Veränderungen der Bodeneigenschaften, wie z.B. Bodenwasserhaushalt, chemische Bodenqualität und Streuqualität, die vom Klimawandel beeinflusst werden. Regenwürmer beeinflussen als Ökosystem-Ingenieure auch die Lebensraumfunktion für andere Bodenorganismen. Klimabedingte Änderungen des Regenwurmbesatzes wirken sich indirekt auf die gesamte Bodenlebensgemeinschaft aus. Aufgrund ihrer unterschiedlichen Lebensweise haben die verschiedenen Regenwurmarten allerdings unterschiedlichen Einfluss auf die Bodeneigenschaften. Insbesondere die tiefgrabenden Regenwurmarten werden als Schlüsselarten bezeichnet, da ihre Leistung nicht durch die anderer Arten ersetzt werden kann. Viele andere Leistungen werden dagegen nach heutigem Kenntnisstand oft von mehreren Arten erbracht (Redundanz), so dass der Wegfall einer Art keine unmittelbaren Folgen für das System haben muss. Entscheidend für die Leistungen der Bodenlebensgemeinschaft wäre dann weniger der zahlenmäßige Artenschwund, sondern welche Arten wegfallen (COLE et al. 2006). Unter dem Gesichtspunkt der Bedeutung für die Erbringung von Ökosystem-Dienstleistungen ist daher die Konzentration auf Regenwürmer als Schlüsselgruppe und eventuell Schlüsselarten anderer Tiergruppen im Rahmen von Monitoringprogrammen unter pragmatischen Gesichtspunkten vorerst möglich. Es gibt jedoch außer den Ökosystem-Ingenieuren und den Destruenten weitere Schlüsselgruppen im Boden, wie die der bodenbürtigen Pflanzenschädlinge/-krankheiten und ihre Regulatoren (BARRIOS 2007). Deren voraussichtliche Beeinflussung durch veränderte Klimabedingungen ist durch die Erfassung der vorgenannten Schlüsselgruppen vermutlich nicht zu leisten. Auch unter dem Gesichtspunkt des Erhalts der Bodenbiodiversität (BMU 2007) ist die Berücksichtigung nur einer oder zweier Tiergruppen nicht ausreichend, denn die Diversität einer Tiergruppe lässt sich nicht immer hinreichend aus Umweltbedingungen oder der Diversität anderer Tiergruppen ableiten (EKSCHMITT et al. 2003).

Bodenzoologische Erhebungen sind zu aufwändig, um sie in einem rasterbasierten Monitoringprogramm flächendeckend durchzuführen. Wie können nun Aussagen zu Bodenlebensgemeinschaften in die Fläche übertragen werden? Wesentliche Einflussfaktoren für die Bodenlebensgemeinschaft sind neben dem Klima die Bodeneigenschaften und die Bodennutzung. Eine Regionalisierung kann über Verknüpfung mit relevanten Bodeneigenschaften erfolgen, für die Daten flächenhaft vorliegen oder zumindest in höherer Dichte als bodenbiologische Daten. Daten aus Monitoring-

Programmen wie der Boden-Dauerbeobachtung sind von essenzieller Bedeutung zur „Eichung“ der nötigen Verknüpfungsregeln.

Auf Forststandorten bietet sich zur Extrapolation bodenzoologischer Daten in die Fläche in erster Linie eine Verknüpfung mit der Humusform an, da sie in enger funktioneller Wechselbeziehung zur Bodenlebensgemeinschaft steht. Über die Veränderung der Humusform entlang von Klimagradienten lassen sich auch Vorhersagen über Veränderungen von Bodenlebensgemeinschaften als Folge des Klimawandels ableiten. Vorschläge für die Ansprache von Humusformen unter landwirtschaftlicher Bodennutzung finden sich bei BROLL et al. (2006). Anzustreben ist eine europaweite Harmonisierung der Humusformen-Klassifikation und Abgleich von morphologischen, chemischen und biologischen Profilbeschreibungen. Auf Acker- und Grünlandstandorten kann man auch die Möglichkeit nutzen, anhand abiotischer Schlüsselfaktoren Erwartungswerte hinsichtlich bestimmter Parameter der Bodenlebensgemeinschaft zu formulieren (BEYLICH et al. 2005, RÖMBKE et al. 2005, UMWELTBUNDESAMT 2007). Über eine Verknüpfung der Bodenlebensgemeinschaft mit den Schlüsselfaktoren pH-Wert, Bodenart und Feuchte lassen sich so auch für diese Standorte Extrapolationen in die Fläche vornehmen. Regionale Prognosen zu klimabedingten Veränderungen von Humusform, Bodenkundliche Feuchtestufe / mittlerer Grundwasserstand und pH-Wert lassen sich dann für Prognosen zu Veränderungen der Bodenlebensgemeinschaften auf derselben Skala heranziehen. Dabei lassen sich qualitative Veränderungen, wie die der Artenzusammensetzung oder daraus abgeleiteter Parameter, besser prognostizieren als Veränderungen quantitativer Parameter, wie Abundanz und Biomasse, für die wegen größerer zeitlicher und räumlicher Schwankungen nur ungefähre Trends abschätzbar sind.

Zu den Ökosystem-Dienstleistungen der Regenwürmer, aber auch anderer Tiergruppen, gehören die Bildung stabiler Gefügeaggregate und die Schaffung von Grobporen (SCHRADER 1999). Ein durch Trockenheit bedingter niedriger Regenwurmbesatz führt bei Starkregen-Ereignissen zu einer erhöhten Erosionsanfälligkeit von Böden. Bei längeren Nassphasen im Winter sind insbesondere Ackerböden ohne Vegetationsbedeckung und mit niedrigem Regenwurmbesatz anfällig für Verschlämmung und Verdichtung.

Die Aktivität von Bodenorganismen konzentriert sich weitgehend auf den Oberboden. Dieser ist der von Wetter- und Klimaschwankungen am stärksten betroffene Teil des Bodens. Mit zunehmender Sommertrockenheit verschiebt sich die Zersetzung der Streu voraussichtlich aus der Vegetationsperiode heraus in das feuchtere Winterhalbjahr. Dadurch kommt es zur zeitlichen Entkopplung von Nährstofffreisetzung und Nährstoffaufnahme durch die Pflanzen. Eine mögliche Folge wäre ein Nährstoffaustrag mit dem Sickerwasser und Anreicherung, z.B. von Nitrat im Grundwasser in Regionen, die im Winter durch hohe Sickerwasserraten gekennzeichnet sind.

Zur zeitlichen Verschiebung des Streuabbaus kommt außerdem eine räumliche, vertikale Verschiebung. In stark versauerten Waldböden gibt es diese Möglichkeit jedoch nur begrenzt: Dort herrschen im Mineralboden für Mikroorganismen und feuchthäutige Bodentiere toxische Verhältnisse. Das Bodenleben spielt sich in der Humusauflage ab. Die Streuzerkleinerung wird von der Mesofauna dominiert. Bei lang andauernder Sommertrockenheit können die Tiere nicht in die noch feuchten tieferen Mineralbodenhorizonte ausweichen. Auch Tiergruppen, die von der Toxizität weniger betroffen sind, finden wegen Nahrungsmangel im podsolierten Mineralboden keine geeigneten Lebensbedingungen vor. Das Bodenleben kommt zum Erliegen und regeneriert sich in der feuchten Jahreszeit entsprechend langsamer. Die Folge ist eine weitere Verschlechterung der Humusform (siehe Abb. 3.12). Wegen des verringerten Abbaus organischer Substanz kommt es zur erhöhten CO_2-Bindung in der Humusauflage. Eine ähnlich ungünstige Entwicklung ist in Regionen zu erwarten, deren Jahresniederschlag klimawandelbedingt deutlich ansteigt. Hier kann es zu erhöhter Basenauswaschung und damit zu einem (weiteren) Absinken des pH-Wertes im Oberboden und dadurch zu einer Verarmung des Artenspektrums im Boden kommen.

Bei biologisch aktiven Böden mit Mull-Humusformen können längere Trockenphasen dazu führen, dass die Streu nicht mehr vollständig in den Mineralboden eingemischt und abgebaut wird. Es bildet sich eine Oh-Lage. Je nachdem, ob Regenwürmer im Mineralboden weiterhin aktiv sind oder ausfallen, entstehen die Humusformen Amphi oder Moder. Unter mediterranem Klima ist der Amphi eine weit verbreitete Humusform. Auch hier kommt es wegen des verringerten Abbaus organischer Substanz zu einer erhöhten CO_2-Bindung.

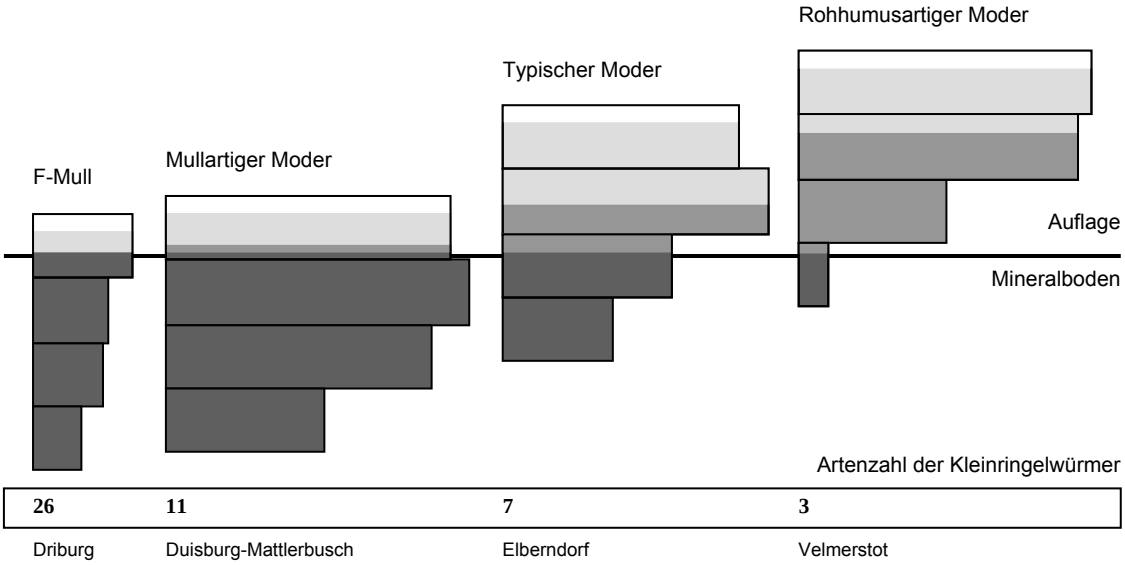


Abb. 3.12: Verschiebung der Aktivität der Kleinringelwurmzönose entlang der Humusformenreihe allmählich vom Mineralboden in die Auflage bei gleichzeitiger Abnahme der Artenvielfalt
Die Balken entsprechen der Abundanz der Tiere in den vier Tiefenstufen 0 – 2,5 cm, 2,5 – 5 cm, 5 – 7,5 cm und 7,5 – 10 cm (aus Graefe 2004).

Durch Klimaänderungen kann es andererseits auch zu verstärktem Abbau organischer Substanz kommen, z.B. durch Senkung des Wasserstandes in Böden mit derzeit durch Nässe gehemmtem Abbau (Moore, Bruchwälder). An solchen Nassstandorten ist die Aktivität der Bodenfauna eingeschränkt und würde bei oberflächennaher Austrocknung steigen. Die Bodenfauna wäre in diesem Fall an erhöhten CO_2-Freisetzungen beteiligt.

Die Eigenschaften des Oberbodens sind stark von der Nutzung beeinflusst. Das Ausmaß von Auswirkungen des Klimawandels auf die Bodenfauna hängt daher von der Nutzungsart und der Bewirtschaftung ab. Insbesondere auf intensiv landwirtschaftlich genutzten Standorten stellen ungünstige Klimabedingungen nur einen Stressfaktor unter vielen dar. Auf landwirtschaftlich genutzten Flächen wird es klimabedingt zu Landnutzungsänderungen kommen. Die Anpassung der Bodenbiozönose daran kann erheblich länger dauern als die Umsetzung der Nutzungsänderung, z.B. bei Grünlandumbruch (CONSIDER, ohne Jahr). Auch an Forststandorten oder extensiv genutzten Standorten ergeben sich indirekte Effekte auf die Verbreitung der Arten durch die klimabedingte Veränderung der Vegetation, da letztere über die Streuqualität die Bodenfauna beeinflusst. So gehört z.B. die Fichte zu den Arten, für die die Fläche mit geeig-

neten Wuchsbedingungen in Deutschland klimabedingt deutlich abnehmen wird (siehe Abb. 3.10; KÖLLING et al. 2007), während Baumarten mit deutlich anderen Stoffgehalten und Abbaueigenschaften der Streu, wie z.B. Walnuss und Ess-Kastanie, regional begünstig werden. Veränderte Landnutzung und Bewirtschaftung aufgrund von Klimaveränderungen haben möglicherweise regional stärkere Auswirkungen auf die Bodenlebensgemeinschaft als der Klimawandel selbst (indirekte Effekte), können aber auch im positiven Sinn zur Minderung der direkten Folgen eingesetzt werden (ERNST & EMMERLING 2009).

Datenbedarf, Datenangebot und Dateneignung

Aus den beschriebenen Auswirkungen von Klimaänderungen auf die Bodenfauna ergibt sich der Datenbedarf zum Nachweis dieser Auswirkungen.

Für die erfassten Bodentiergruppen sollten Daten zu den Parametern **Artenspektrum, Abundanz, Dominanz** und **Frequenz** der Arten sowie (nur bei Regenwürmern) auch zur **Biomasse** erhoben werden. Damit werden Veränderungen der Artenzusammensetzung, aber auch Verschiebungen der Dominanz bei gleicher Artenzusammensetzung nachweisbar. Eine Erhebung auf Artebene ist im Allgemeinen obligatorisch, da nur über das Artenspektrum eine Verknüpfung mit abiotischen Standortfaktoren möglich ist. Das Artenspektrum ist zudem erheblich geringeren saisonalen Schwankungen ausgesetzt als quantitative Parameter wie die Abundanz.

Um die möglichen Reaktionsmuster der Bodenfauna auf Klimaveränderungen beurteilen zu können, reicht die Untersuchung einer Tiergruppe nicht aus. Empfehlenswert ist die Erfassung mindestens je einer Indikatorgruppe der **Makrofauna** (in der Regel Regenwürmer) und der **Mesofauna** (z.B. Enchytraeiden, Collembolen). Dies ist auch deshalb sinnvoll, weil Regenwürmer an einigen Standorten kaum präsent sind (z.B. an stark sauren Standorten). Dieser schon von BARTH et al. (2001) als obligatorisch definierte Parametersatz für bodenzoologische Untersuchungen auf BDF wird auch international bei Monitoringprogrammen vorgeschlagen (RUTGERS et al. 2008; KIBBLEWHITE et al. 2008).

Im Rahmen des Bodenmonitorings sollten alle wichtigen **Varianten und Kombinationen von Nutzung und Standortfaktoren** in ausreichender Zahl repräsentiert sein. Dazu zählen auch extensiv oder nicht genutzte Standorte sowie Extremstandorte (z.B. Trocken- und Nassstandorte). Bei grundwasserbeeinflussten Standorten sollten aktuelle Informationen zum **Grundwasserflurabstand** vorliegen, die über eine bodenkundliche Horizontansprache hinausgehen (mindestens monatliche Messungen). Die Nutzungsgeschichte muss bekannt sein (BOVA 2008). Bei Acker- und Grünlandstandorten wird die Bewirtschaftung mittels Schlagkarteien dokumentiert. Bei anderen Nutzungsformen sollten ggf. erfolgte Bewirtschaftungsmaßnahmen ebenfalls routinemäßig erfasst und mit den BDF-Daten archiviert werden.

Zur Darstellung von Klimawirkungen auf die Beziehung zwischen Regenwurmbesatz und Bodengefüge im Hinblick auf Verdichtung und Erosion ist eine quantitative Regenwurmerfassung auf Bodenmonitoringflächen unter Ackernutzung notwendig. Durch die Erhebung auf Artebene ist eine Differenzierung nach Tiefgräbern (Vertikalbohrer) und Krumenbewohnern (endogäische und epigäische Arten) möglich, die unterschiedliche Leistungen hinsichtlich des Gefüges erbringen. Gleichzeitig sind bodenphysikalische und **Gefügeparameter** notwendig (Gefüge, effektive Lagerungsdichte, Porengrößenverteilung; mit Wiederholungen in mehrjährigem Abstand, vgl. WILKE et al. 2009).

Zur Abschätzung der Auswirkungen auf den Streuabbau auf Forstflächen ist die Beschreibung des **morphologischen Humusprofils** und des **biologischen Humusaktivitätsprofils** (vertikale Verteilung der biologischen Aktivität) erforderlich. Letzteres ergibt sich z.B. aus der Erfassung der Tiefenverteilung der Enchyträen (Kleinringelwürmer). Diese Tiergruppe ist feuchthäutig und reagiert auf starke Versauerung im Mineralboden sehr empfindlich. Die ebenfalls feuchthäutigen Regenwürmer sind nach Standardmethoden nicht mit einer vertikal stratifizierten Probenahme zu erfassen und kommen an den stark sauren Standorten meist nur in sehr geringer Arten- und Individuenzahl vor. Die Tiefenverteilung der biologischen Aktivität lässt sich an weniger sauren Standorten ebenfalls durch schichtweise erfassbare Gruppen der Mesofauna (z.B. Enchyträen, Collembolen) nachweisen. Die Berücksichtigung spezieller Aktivitätsparameter, wie Streuabbau (z.B. durch Köderstreifen oder Streubeutel) scheint für Monitoringzwecke wenig geeignet. Die Ergebnisse sind tiergruppenunspezifisch und unterliegen deutlichen saisonalen Schwankungen. Bei den im Bodenmonitoring üblichen Un-

tersuchungsintervallen von mehreren Jahren sind mit diesen Methoden kaum aussagekräftige Ergebnisse zu erwarten.

Zum Nachweis von Veränderungen sind wiederholte Untersuchungen notwendig. Direkt klimabedingte Veränderungen der Bodenlebensgemeinschaft gehen Veränderungen anderer Parameter, wie z.B. des morphologischen Humusprofils, unter Umständen voraus. Die **Zeitabstände für Wiederholungsuntersuchungen** der Regenwürmer und Enchytraeiden auf BDF werden bei BARTH et al. (2000) mit > 5 Jahre angegeben und sollten aus unserer Sicht 10 Jahre nicht überschreiten. Dabei ist zu berücksichtigen, dass sich Änderungen der Lebensgemeinschaft am besten über Zeitreihen nachweisen lassen, die bei kürzeren Untersuchungsintervallen eher zur Verfügung stehen. Da qualitative Veränderungen andererseits Zeit benötigen, scheinen zu kurze Intervalle (1 bis 2 Jahre) ebenfalls nicht sinnvoll. Außerdem kommt es bei einem engeren Zeitintervall insbesondere auf Flächen ohne Bodenbearbeitung schneller zu einem „Verbrauch“ ungestörten BDF-Bodens. Dieser Effekt muss ggf. durch angepasste Probenahmedesigns kompensiert werden (z.B. graduelle Verschiebung der Probenahmepunkte).

Daten zur **geographischen Verbreitung** von Arten der Bodenfauna sind für die Prognose von Ausbreitungsprozessen notwendig, liegen aber weder für Deutschland noch für Europa flächendeckend vor. Hierzu können Monitoringprogramme wie die Boden-Dauerbeobachtung nur einen Teilbeitrag leisten. Über welche Forschungs- und Monitoringprogramme darüber hinaus die Datenbasis zur Bearbeitung dieses Aspekts gewonnen werden soll, ist eine politische Entscheidung, die auch eine Abstimmung auf europäischer Ebene einbeziehen muss. Angesiedelt beim EU Joint Research Centre gibt es seit 2008 eine Soil Biodiversity Working Group, die es sich unter anderem zum Ziel gesetzt hat, eine Datenbank zur Verbreitung von Bodenorganismen aufzubauen, gespeist aus Daten, die die Mitgliedsstaaten beitragen[16]. Dabei wird gleichzeitig das Ausmaß der Informationslücken aufgedeckt. Da es sich dabei primär um eine ehrenamtlich arbeitende Expertengruppe handelt, ist derzeit unklar, wann mit aussagefähigen Ergebnissen zu rechnen ist. Außerdem wäre zu prüfen, ob der Ecoregions-Ansatz, der von der European Food Safety Authority (EFSA) für bodenökotoxikologische Fra-

[16] http://eusoils.jrc.ec.europa.eu/library/themes/biodiversity/wg.html

gestellungen vorgeschlagen wird, für Untersuchungen zu Wirkungen des Klimawandels auf die Bodenfauna herangezogen werden kann (EFSA 2009).

Temperaturänderungen der Luft werden gedämpft im Boden weitergegeben. In welcher Weise relativ geringe Veränderungen der mittleren **Bodentemperatur** langfristig die Bodenlebensgemeinschaft verändern, ist unter Freilandbedingungen kaum untersucht. Der kritische Faktor bei hohen Temperaturen ist eher der Wassergehalt, da in den gängigen Klimaszenarien eine Temperaturerhöhung im Sommerhalbjahr meist mit einem Rückgang der Niederschläge einhergeht. Im Winterhalbjahr sind die entscheidenden Informationen Länge und Intensität der Frostperioden. Hier würden aber nach unserer Ansicht Daten zur Temperatur der bodennahen Luftschicht schon ausreichende Aussagemöglichkeiten liefern. Messungen der Bodentemperatur wären nur nutzbar, wenn sie direkt auf der jeweiligen Monitoringfläche in ausreichend hoher zeitlicher Auflösung vorgenommen würden. Der damit verbundene Messaufwand ist auf Basis-BDF sicher nicht vertretbar. Für ausgewählte Intensiv-BDF scheinen Messungen der Bodentemperatur in Kombination mit bodenbiologischen Untersuchungen durchaus sinnvoll. Für die Interpretation der Daten der Basis-BDF sind die folgenden Klimadaten von einer für die jeweilige BDF repräsentativen Klimastation notwendig, wie auch vom BOVA (2009) für Fragestellungen zum Themenkomplex Humus/Klimawandel empfohlen wird:

- langjährige mittlere Niederschläge, Temperaturen und Klimatische Wasserbilanzen im Sommer bzw. Winterhalbjahr
- mittlerer Jahresniederschlag, mittlere Jahrestemperatur und mittlere Klimatische Wasserbilanz der letzten vollständigen Dekade
- Jahreswerte für Niederschlag, Temperatur und Klimatische Wasserbilanz seit Beginn der BDF-Untersuchungen
- Monatswerte für Niederschlag, Temperatur und Klimatische Wasserbilanz seit Beginn der BDF-Untersuchungen.

Der Datenbedarf ist in Tabelle 3.25 zusammengefasst und dem Datenangebot aus bestehenden Monitoringaktivitäten gegenübergestellt. Für die Zusammenstellung des Datenangebots wurden im Wesentlichen die im BOKLIM-Vorhaben erstellten Steckbriefe für Bodendaten (siehe Kap. 3.1.1) und darin enthaltene Verweise auf Methodenhandbücher o. ä. einzelner Monitoringprogramme herangezogen. Für das Datenange-

bot auf BDF wurde insbesondere eine Zusammenstellung zu den Messparametern der Bundesländer genutzt, die im UBA F+E-Vorhaben „Auswertung der Veränderungen des Bodenzustandes für Boden-Dauerbeobachtungs-Flächen (BDF) und Validierung räumlicher Trends unter Einbeziehung anderer Messnetze“ (FKZ 3707 71 203) erarbeitet wurde. Diese Zusammenstellung beruht auf einer Länderumfrage, wobei die Länder in unterschiedlichem Maß von der Möglichkeit Gebrauch gemacht haben, zu verschiedenen Parametern keine Angaben zu machen.

Tab. 3.25: Datenbedarf und Datenangebot zu Auswirkungen von Klimaänderungen auf die Bodenfauna

Klimawirkung	Datenbedarf	Datenangebot
Änderung der Artenzusammensetzung der Bodenlebensgemeinschaft sowie der absoluten und relativen Abundanz der Arten	Artenspektrum, Abundanz, Dominanz und Frequenz der Arten sowie (nur bei Regenwürmern) auch Biomasse Geographische Verbreitung von Arten zur Abschätzung der Toleranzgrenzen von Arten gegenüber wesentlichen Klimaparametern	BDF: Standardparameter, wenn Bodenfauna bearbeitet wird Bodenzoologische Forschungsprojekte: ebenfalls Standardparameter BZE, Dauerfeldversuche: in Einzelfällen Regenwürmer Literatur, Forschungsberichte, Soil Biodiversity Working Group JRC (EU)
Veränderung der Ökosystem-Dienstleistungen der Bodenlebens-gemeinschaft	Erfassung mindestens je einer Indikatorgruppe der Makrofauna (meist Regenwürmer) und der Mesofauna (z.B. Enchytraeiden, Collembolen). Differenzierung der Regenwürmer nach Tiefgräbern (Vertikalbohrer), endogäischen Arten (Mineralbodenbewohner) und epigäischen Arten (Auflagehumusbewohner). Gefügeparameter Trockenrohdichte Porengrößenverteilung Humusform Bodenart, pH-Wert, GW-beeinflusste Horizonte Grundwasserflurabstand (mind. monatlich)	BDF: Regenwürmer auf Mehrzahl der BDF in BB, BY HH, NW, SH, ST, TH SH, HH und NW außerdem auch Kleinringelwürmer Wenn Regenwürmer auf BDF erfasst, dann auch immer Differenzierung in ökologische Gruppen BDF, BZE I + II, ICP Forest Level I + II, BÜK 200 BDF, ICP Forest Level I+II, BZE II, BÜK 200 BDF BDF, ICP Forest Level I + II, BZE I + II, BÜK 200 BDF, ICP Forest Level I + II, BZE I + II, BÜK 200 BDF: nicht oder unvollständig; BÜK 200
durch aufgrund von Klimaveränderungen veränderte Nutzung und Bewirtschaftung hervorgerufene Veränderungen der Bodenlebensgemeinschaft (indirekte Effekte).	Repräsentanz aller wichtigen Varianten und Kombinationen von Bodeneigenschaften und Nutzungstypen in ausreichender Zahl Fortlaufende Informationen zur Bewirtschaftung	Hauptnutzungsarten Acker, Grünland und Forst sind gut repräsentiert; Lücken bei Sondernutzungen und bei ungenutzten oder Extremstandorten (z.B. intakte Moore, Bruchwälder, Trockenrasen, Dünen) BDF: insbesondere für Forst und Sondernutzungen teils unvollständig/nicht systematisch

Datendefizite

Aus dem Vergleich von Datenbedarf und -angebot ergeben sich folgende Defizite des Datenangebots:

- Die Boden-Dauerbeobachtung ist das einzige Monitoringprogramm in Deutschland, welches die Bodenfauna in nennenswertem Umfang abdeckt. Allerdings wird der von BARTH et al. (2001) als obligatorisch definierte Parametersatz der Bodenfauna für Boden-Dauerbeobachtungsflächen derzeit nur in SH, HH und NW vollständig umgesetzt.
  - In fünf Bundesländern wird die Bodenfauna auf BDF nicht oder nur in geringem Umfang berücksichtigt (ohne Stadtstaaten). Da die BDF als Referenzflächen für Regionalisierungen und die Bewertung von Veränderungen dienen, hat die Referenz folglich Lücken bezüglich regionalspezifischer Besonderheiten.
  - Wird die Bodenfauna berücksichtigt, werden meist nur Regenwürmer untersucht, was nicht ausreichend ist für Aussagen zu Klimawirkungen auf die Bodenbiodiversität und Dienstleistungen der Bodenlebensgemeinschaft.
- Fehlende Repräsentanz einzelner Nutzungen unter den BDF in einzelnen Bundesländern (z.B. keine Acker-BDF in NW und RP). In Kombination mit fehlenden Untersuchungen zur Bodenfauna in anderen Bundesländern ergibt sich daraus z.B. ein Mangel an Daten zur Regenwurmfauna auf Acker-BDF im gesamten Westbereich Deutschlands (NI, NW, RP, BW? SL? HE?). Diese Region ist weder bezüglich des aktuellen Klimas noch regionaler Klimaszenarien mit den Regionen vergleichbar, für die Daten zu Acker-BDF vorliegen (SH, BY, BB, TH, ST).
- Wahrscheinlich unzureichende Repräsentanz von Sondernutzungen und Extremstandorten (z.B. Moore, Trockenstandorte). In der Parameterliste des o. g. UBA-Vorhabens und im BOVA-Bericht (BOVA 2008) werden die Sondernutzungen und Extremstandorte allerdings nicht spezifiziert, so dass detaillierte Informationen zum Umfang der Berücksichtigung solcher Standorte nicht vorliegen.

- Ob der Grundwasserflurabstand von grundwasserbeeinflussten BDF in allen Bundesländern in ausreichender zeitlicher Auflösung untersucht wird (mind. monatlich), ist unklar. Zur Herstellung eines Zusammenhangs einer Veränderung der Bodenlebensgemeinschaft und klimabedingt veränderter Grundwasserstände wären diese Daten wünschenswert.
- Die Unterscheidung von direkt klimabedingten, indirekt klimabedingten (Nutzungsänderung, Bewirtschaftungsanpassung) und nicht klimabedingten Einflüssen auf die Bodenlebensgemeinschaft ist nur mit Hilfe von Informationen zur Bewirtschaftung möglich. Während die Führung von Schlagkarteien für landwirtschaftlich genutzte Standorte selbstverständlich ist, scheint bei Forst- und Sonderstandorten die Dokumentation von Bewirtschaftungsmaßnahmen unterschiedlich organisiert und institutionalisiert (SPATZ 2001, BOVA 2009).
- Daten zu Gefügeparametern, Lagerungsdichte, Porengrößenverteilung und Humusform werden im BDF-Programm standardmäßig nur einmalig aufgenommen. Für eine Verknüpfung der Veränderung bodenzoologischer Parameter mit Veränderungen dieser Parameter ist das nicht ausreichend, da auch für diese Parameter direkt oder indirekt klimabedingte Veränderungen zu erwarten sind.
- Bodenbürtige Pflanzenkrankheiten und -schädlinge werden derzeit durch BDF nicht erfasst. Eine Erfassung über andere Monitoringprogramme ist zu prüfen, da klimabedingte Veränderungen wahrscheinlich sind.
- Bodenzoologische und mikrobiologische Parameter werden derzeit oft in verschiedenen Jahren erfasst, was die Identifizierung gemeinsamer Trends erschwert.

Bei den rasterbasierten Erhebungsprogrammen im Forst (BZE, ICP Forest etc.) kann die Bodenfauna wegen des damit verbundenen hohen Aufwands nicht flächendeckend untersucht werden. Der Wert dieser Programme hinsichtlich Aussagen zur Bodenlebensgemeinschaft besteht darin, dass hier mit relativ hoher Auflösung abiotische Bodenfaktoren untersucht werden, mit denen bodenfaunistische Daten verknüpft und so in die Fläche übertragen werden können. Die dafür nötigen abiotischen Parameter werden in den genannten Programmen oder mit der Bodenübersichtskarte der Bundesrepublik Deutschland 1 : 200.000 (BÜK 200) im Wesentlichen abgedeckt. Langfristig sind die Daten aus diesen Programmen/Karten jedoch nur verwendbar, wenn die Daten in regelmäßigen Abständen aktualisiert werden.

Fazit zur Eignung der vorhandenen Daten für Bewertung und Prognose von Auswirkungen des Klimawandels auf die Bodenfauna:

Auf Boden-Dauerbeobachtungsflächen liegen zum Teil Daten von drei Untersuchungsterminen vor. Anhand dieser **Zeitreihen** lassen sich Veränderungen der Bodenlebensgemeinschaft für den jeweiligen Standort aufzeigen. Unter Berücksichtigung der relevanten Rahmenbedingungen (Nutzung, Bewirtschaftung, Grund- und Stauwasser, Klimaänderung) lassen sich Hinweise auf direkte oder indirekte Einflüsse des Klimawandels auf das Artenspektrum finden. Für verschiedene bodenzoologische Parameter liegen aus der Boden-Dauerbeobachtung für mehrere Bundesländer Vorschläge für Referenzwertbereiche vor, die zur Einschätzung der aktuellen Situation und zur Bewertung von Veränderungen herangezogen werden können (UMWELTBUNDESAMT 2007).

Räumliche Aussagen zu Bodenzustand und dessen Veränderungen

Zur Übertragung von standortbezogenen Messergebnissen in die Fläche ist die Verknüpfung der bodenzoologischen Daten mit flächenhaft verfügbaren Bodeneigenschaften (Humusform, Bodenart, pH-Wert, Grundwasser) und der Nutzung notwendig. Auf dieser Basis lassen sich zwar keine Aussagen zum Artenspektrum im Einzelnen machen. Es können aber Vorhersagen zum Vorkommen ökologischer Gruppen der Regenwürmer (Tiefgräber, Mineralbodenbewohner, Streubewohner) und zum Vorkommen bestimmter Typen der Bodenbiozönose gemacht werden. Begrenzend für den räumlichen Detaillierungsgrad wirkt die räumliche Auflösung, mit der die Daten für die Bodeneigenschaften vorliegen. Die dafür notwenigen Verknüpfungsregeln sind, ebenso wie die oben genannten Bewertungsansätze, derzeit jedoch Expertenwissen, welches nicht in einem bundesweit validierten und abgestimmten Regelwerk vorliegt (vgl. UMWELTBUNDESAMT 2007).

In einem weiteren Schritt müssen die Befunde und ggf. Prognosen zur klimabedingten Veränderung der Bodenlebensgemeinschaft mit deren Leistungen in Beziehung gesetzt werden. Dafür sind entsprechende Informationen zu Zusammensetzung und Leistung von Bodenlebensgemeinschaften unter verschiedenen Klimabedingungen, z.B. auch in mediterranen Regionen, notwendig. Diese Informationen sind zurzeit nur sehr lückenhaft vorhanden. Es ist auch nicht auszuschließen, dass sich ganz neue Gemeinschaften bilden, die in ihrer Zusammensetzung und Leistung unvorhersehbar sind.

Aussagen zur Repräsentanz der BDF und zur Mindestanzahl verschiedener Standortsituationen lassen sich nur länderübergreifend bzw. bezogen auf naturräumliche Einheiten machen. Eine bundesweite Repräsentanzanalyse steht noch aus (BOVA 2009).

Eingangsdaten für Modellierungen

Modellierungen zur Wirkung des Klimawandels auf die Biodiversität, wie sie für andere Organismengruppen, z.B. höhere Pflanzen vorliegen (KÜHN et al. 2009), sind für Bodenorganismen derzeit nur eingeschränkt durchführbar, da die verfügbaren Eingangsdaten (Klima-Ökogramme der Arten) meistens nicht ausreichen. Für Schlüsselarten ist die Darstellung von potenziellen Verbreitungsarealverschiebungen über intensive Literaturrecherche zusätzlich zur Auswertung der BDF-Daten möglich. Da die Verbreitungsareale vieler Arten über die Grenzen Deutschlands hinausgehen, können Daten aus nationalen Monitoring- und Erhebungsaktivitäten nur einen Teilbeitrag für diese Fragestellung liefern. Bei Arten, deren Verbreitungsgebiet bis in den mediterranen Raum reicht, ist abzusehen, dass die prognostizierte Erwärmung keine Bedrohung für ihr Vorkommen darstellt. Für Regenwürmer zeichnet sich z.B. Folgendes ab: Tendenziell kommt es eher zu einer Zunahme der Artenzahl, da viele der hier vorkommenden Arten auch unter wärmeren/trockeneren Bedingungen existieren können (z.B. PAVLÍČEK et al. 2003), andererseits aber eine Reihe von Arten z.B. des Mittelmeerraums hier bisher nicht vorkommt.

Auswirkungen des Klimawandels auf den Streuabbau können im Bodenmonitoring über eine Veränderung des biologischen Humusaktivitätsprofils erfasst werden, das einer Veränderung des morphologischen Humusprofils vorausgeht.

Für **Versickerung und Erosion** sind die Makroporen im Boden von Bedeutung. Einige Modelle zu diesem Problemkreis berücksichtigen den präferentiellen Fluss in Makroporen. Speziell biogene Makroporen (Regenwurmröhren) gehen allerdings bisher meist nicht als Eingangsparameter ein (vgl. LINDAHL et al. 2009). Die Zahl der vorhandenen Regenwurmröhren (Tiefgräber) ist kein Untersuchungsparameter auf BDF oder in anderen Bodenmonitoringprogrammen. Als Eingangsparameter stünde die Siedlungsdichte tiefgrabender Regenwürmer zur Verfügung.

Anwendbarkeit für Prozessbetrachtungen

Für eine Erstellung von **Stoffbilanzen, Stoffein- und -austräge**n sind die auf BDF erhobenen bodenzoologischen Daten nicht geeignet. Für die Interpretation der Prozessbetrachtungen können jedoch auch Daten zur Bodenfauna herangezogen werden. Für Stoffausträge spielt zum Beispiel die durch Klimaänderungen bedingte zeitliche Aktivitätsverschiebung der Bodenlebensgemeinschaft ins Winterhalbjahr wegen Sommertrockenheit eine Rolle (Nitrataustrag) (siehe auch Kap. 3.3.3 und 3.3.4). Daraus ergeben sich Hinweise auf mögliche Anpassungsstrategien bei Nutzung und Bewirtschaftung.

Anforderungen an Daten und ihre effiziente Nutzung

Die Erfassung der Regenwürmer auf BDF erfolgt in den Bundesländern im Allgemeinen mit einer Kombination aus Formalinextraktion und Handauslese. Die Methode ist standardisiert (ISO 2006a), wird aber zum Teil nach Nutzungs- und anderen Erfordernissen angepasst. Die Methodik sollte in jedem Fall ausführlich dokumentiert werden, damit (a) länderübergreifende Vergleiche möglich sind und (b) bei einem Wechsel der bearbeitenden Personen die Daten verschiedener Wiederholungsuntersuchungen im selben Bundesland vergleichbar sind. Dasselbe gilt für die Untersuchung der Kleinringelwürmer (bisher drei Bundesländer) und der Mikroarthropoden (bisher kaum auf BDF untersucht) (ISO 2006b und 2007). Die bodenzoologischen BDF-Daten sind meist nur für fachlich involvierte Behörden verfügbar. Die Veröffentlichung aufbereiteter Daten in Form von Berichten oder im Internet findet nur auszugsweise und in größeren Zeitabständen statt.

Empfehlungen für künftige(s) Monitoring und Erhebungen

Die bodenzoologischen Daten aus der Boden-Dauerbeobachtung sind für das Monitoring klimabedingter Veränderungen nutzbar. Die Repräsentanz der vorliegenden Daten für die gesamte Region Deutschland ist jedoch bisher unzureichend. Empfehlungen zur Verbesserung der Eignung vorliegender Daten für Anwendungen in der Klimafolgen- und -anpassungsforschung zielen daher aus unserer Sicht im Wesentlichen auf eine

Vereinheitlichung der Umsetzung des Messprogramms auf den vorhandenen BDF-Flächen. Das heißt:

- Erfassung der Regenwürmer und einer Gruppe der Mesofauna (z.B. Enchytraeiden, Collembolen) auf BDF aller Bundesländer
- Fortsetzung der bodenzoologischen Untersuchungen auf bereits untersuchten BDF, da sich nur über Zeitreihen Aussagen zu Veränderungstendenzen ableiten lassen
- bei Bundesländern mit sehr vielen BDF muss nicht notwendigerweise auf allen Flächen die Bodenfauna untersucht werden, d.h. eventuell fachliche sinnvolle Auswahl der Flächen in Abstimmung mit den Nachbarländern (Naturräume machen nicht vor Landesgrenzen halt)
- Repräsentanzanalyse, auch im Hinblick auf Standort-Nutzungskombinationen, die von klimabedingten Veränderungen voraussichtlich besonders betroffen sind
- methodische Harmonisierung der bodenmikrobiologischen und -zoologischen Untersuchungen sowie eine ausführliche Dokumentation der verwendeten Methodik
- Erfassung Grundwasserflurabstand auf grundwasserbeeinflussten Standorten (Grundwasserflurabstand < 1 m) mit monatlicher Auflösung. Dies entspricht der Empfehlung des BOVA (2008). Da auf landwirtschaftlich genutzten Standorten der Grundwasserflurabstand über Drainagesysteme reguliert wird, wäre eine Dokumentation des Grundwassermanagements hilfreich.
- Wiederholungsuntersuchungen für Gefügeparameter, Lagerungsdichte, Porengrößenverteilung und Humusform, um eine Verknüpfung der Veränderung bodenzoologischer Parameter mit Veränderungen dieser Parameter zu ermöglichen (Vorschlag: alle 10 Jahre und nach besonderen Ereignissen wie z.B. Grünlandumbruch)
- Fortlaufende Dokumentation der Bewirtschaftungsmaßnahmen auf allen BDF (nicht nur Ackerflächen). Die Unterscheidung von direkt klimabedingten, indirekt klimabedingten (Nutzungsänderung, Bewirtschaftungsanpassung) und nicht klimabedingten Einflüssen auf die Bodenlebensgemeinschaft ist nur mit Hilfe von Informationen zur Bewirtschaftung möglich.

- Bei Neuaufnahme oder Ergänzung von Monitoringaktivitäten Orientierung an der Methodik bestehender Untersuchungen.
- Messung der Bodentemperatur auf ausgewählten Intensiv-BDF-Standorten in Kombination mit bodenbiologischen Untersuchungen.

Zur **Verbesserung der Datenverfügbarkeit** und für eine effiziente Datennutzung empfiehlt sich (nicht nur für bodenzoologische Daten) eine zeitnahe Eingabe der erhobenen Daten in die jeweilige Archivierungs-Datenbank. Die digitale Archivierung der Daten sollte so strukturiert und organisiert sein, dass eine fachlich fundierte Nutzung der Daten durch Dritte mit geringem Aufwand möglich ist.

Neben einem Defizit von Datenerhebungen gibt es außerdem **Defizite bei der Datenauswertung und -verknüpfung** hinsichtlich der Wirkzusammenhänge, die von Klimaveränderungen voraussichtlich beeinflusst werden. Hier seien nur beispielhaft genannt:

1. Korrelation der gemessenen biologischen Parameter (Mikrobiologie, Bodenfauna, ggf. Vegetation).

2. Einfluss von Bewirtschaftung und Nutzungsänderungen auf die Bodenlebensgemeinschaft, auch im Hinblick auf Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel.

3. Zusammenhang zwischen mittlerem Grundwasserstand und dem Vorkommen tiefgrabender Regenwürmer (oder allgemein zwischen einem geeigneten Parameter der Bodenfeuchte und der Bodenlebensgemeinschaft).

4. Zusammenhänge zwischen bodenphysikalischen Faktoren (Gefüge, Porenvolumen, Porengrößenverteilung) und Bodenlebensgemeinschaft im Hinblick auf Verdichtung, Versickerung, Verschlämmung und Erosionsneigung.

5. Weiterentwicklung des Expertenwissens zu Referenzwerten für die untersuchten Tiergruppen für alle Naturräume Deutschlands.

6. Auswertung vorhandener Daten zu relevanten Tiergruppen auf europäischer Ebene, um klimawandelbedingte Veränderungen von Struktur und Funktion der Bodenlebensgemeinschaft besser bewerten und abschätzen zu können.

7. Abschätzung von Ausbreitungsgeschwindigkeiten von Populationen in neue Lebensräume in Relation zu deren klimawandelbedingter Entstehungsgeschwindigkeit.

Dafür sollten auch Erkenntnisse aus einschlägigen Forschungsvorhaben zu Systemprozessen und Bewertungsgrundlagen genutzt werden, wie:

- UBA-Vorhaben „Erfassung und Analyse des Bodenzustands im Hinblick auf die Umsetzung und Weiterentwicklung der Nationalen Biodiversitätsstrategie“
- BMBF-Vorhaben „GBIF Informationssystem Bodenzoologie", FKZ Nr.01LI0901B
- Biodiversitäts-Exploratorien (DFG-Förderung)

Forschungsprojekte zu Klimawirkungen ergänzen unser Wissen zur Bewertung von Monitoringdaten. Wegen ihrer begrenzten Laufzeit werden sie jedoch nicht in der Lage sein, durch den Klimawandel ausgelöste, schleichende Veränderungen der Bodenlebensgemeinschaften nachzuweisen.

3.3.6 Klimarelevante Gase

F. Makeschin; M. Abiy

Vorbemerkung

Böden spielen in der globalen Dynamik der klimarelevanten Gase (sog. THG) eine wichtige Rolle. Sie können dabei sowohl als Senken wie auch Quellen fungieren, je nach ihrer geographischen Lage, des verfügbaren Nährstoffpotentials, ihres Wasser- und Temperaturhaushalts und der Art und Intensität ihrer Bewirtschaftung. Obwohl auf die Landwirtschaft nur 9 % aller Treibhausgasemissionen entfallen, ist sie die Hauptquelle der Emissionen von Methan (CH_4) und Distickstoffoxid (N_2O), die nach neuesten Schätzungen 48 % der CH_4 Emissionen und 52 % der N_20 Emissionen innerhalb der EU ausmachen (EU 2009). CO_2 wird von Pflanzen über die Wurzelatmung sowie durch Mikroorganismen und Bodentiere (heterotrophe Atmung) bei der Mineralisierung organischer Substanzen aus Streu, Humus oder organischen Wirtschaftsdüngern aus Böden freigesetzt, vor allem gefördert durch intensive Bodenbearbeitung. Während die Umwandlung von Wald und Grünland zu Acker die Freisetzung von Kohlendioxid erhöht, bietet die Aufforstung landwirtschaftlich genutzter Flächen ein beträchtliches Po-

tential zur Minderung des CO_2 in der Atmosphäre. Die Bedeutung der Landwirtschaft und insbesondere der Bodennutzung sowohl als Quelle als auch als Senke für Treibhausgase variiert jedoch beträchtlich.

Die klimarelevanten Treibhausgase CO_2, N_2O und CH_4 sind Produkte von *mikrobiellen* Aktivitäten (vgl. Kap. 3.3.4), die durch den Transfer von Elektronen (sog. Redoxreaktionen) erzeugt werden. Die Hauptfaktoren, die diese Redoxprozesse und damit auch mikrobielle Stoffumsetzungen in Böden steuern sind das Redoxpotential, die DOC-Konzentration, und die relevanten Elektronenakzeptoren (O_2, Nitrat, Mn^{4+}, Fe^{3+}, Sulfate und Wasserstoff). Das Redoxpotential (Eh in Volt) bestimmt, ob eine Redoxreaktion stattfindet oder nicht; wenn sie stattfindet, bestimmt der Gehalt von DOC und Elektronenakzeptoren zusammen die Rate dieser biogenen Reaktionen. Jeder Faktor, welcher einen oder mehrere dieser drei Faktoren beeinflusst, verändert auch die Emission von CO_2, N_2O oder CH_4 aus den Böden bzw. zum Teil auch wieder deren Konsumption. Für die Quantifizierung der klimarelevanten Gase (THG) ist es daher essentiell zu verstehen, wie der Einfluss von Eh, DOC und den Elektronenakzeptoren und deren quantitative Reaktionen auf die THG ermittelt werden können; es kommt deshalb entscheidend darauf an, den Einfluss der Klimaänderung auf mikrobielle Stoffumsetzungsprozesse und die Faktoren Eh, DOC und Elektronenakzeptoren herauszuarbeiten und zu prognostizieren.

Hypothese:
Klimawandel sowie Art und Intensität der Landnutzung beeinflussen die Spurengasemission.

Häufigere Austrocknung und Wiederbefeuchtung sowie Verschiebungen der Saisonalität führen zu einer Erhöhung der CO_2-, CH_4- und N_2O-Freisetzungen. Diese Gefahr nimmt insbesondere zu, da im Rahmen des globalen Wandel zukünftig die Landnutzung intensiviert werden wird. Das Ausmaß der Freisetzung klimarelevanter Spurengasen ist von der Art der Landnutzung (Landwirtschaft/ Forstwirtschaft) und als auch deren Intensität (z.B. Bodenbearbeitung, N-Düngung, organische Düngung, Rückführung von Biogas-Gülle) abhängig.

Klimaänderungen und Wirkungsprognose

Die Auswirkung der Klimaänderung auf die Emission klimarelevanter Gase aus Böden ist sehr komplex (siehe Abb. 3.13). Die Freisetzung dieser Gase wird durch steigende Bodentemperaturen gefördert, sofern die damit zusammen hängenden biologischen Prozesse nicht durch andere Faktoren limitiert werden (POWLSON 2005). Daraus kann aber nicht abgeleitet werden, dass der klimaänderungsbedingte Anstieg der Temperatur grundsätzlich zur Zunahme der THG-Emissionen aus Böden führen wird. Der Grund dafür liegt in der Komplexität der beteiligten Prozesse und Wechselwirkungen zwischen den Einflussfaktoren begründet. Ein einfaches Beispiel ist die Wechselwirkung zwischen der Temperatur und dem Bodenwassergehalt: während eine Temperaturerhöhung die biologische Aktivität bis zu einem gewissen Grad fördert, kann sie durch ihre indirekten Auswirkungen auf die Transpirations- und Evaporationsprozesse den Bodenwassergehalt soweit herabsetzen, dass die biologische Aktivität in dessen Folge vermindert wird.

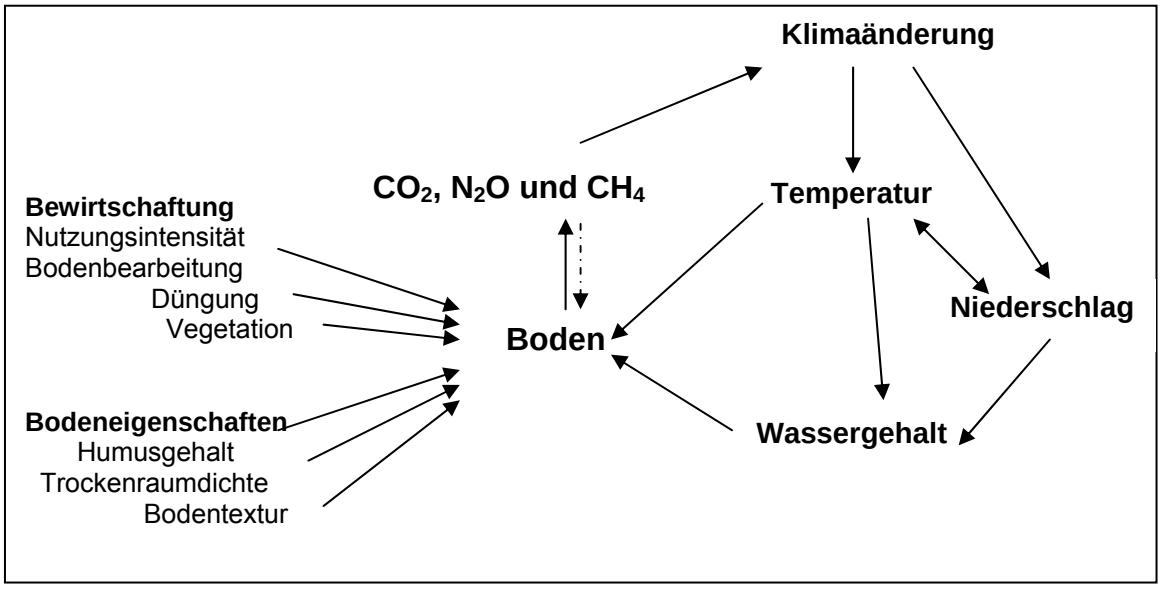


Abb. 3.13: Vereinfachtes Schema für Faktoren der THG-Emissionen auf landwirtschaftlich genutzten Flächen und ihre Wechselwirkungen mit Temperatur, Niederschlag und Bodenwasserhaushalt (verändert nach KAMP et al. 1998)

a) Kohlendioxid (CO_2)

Unter den klimarelevanten Spurengasen ist Kohlendioxid das mengenmäßig bedeutsamste. Die Freisetzung von CO_2 aus dem Boden bzw. die so genannte Bodenatmung ist die größte Kohlenstoffquelle terrestrischer Ökosysteme. Sie übersteigt global jährlich die Menge, die durch die Verbrennung fossiler Brennstoffe freigesetzt wird, um den Faktor 10 (SCHLESINGER 1997). Bereits geringfügige Klimaänderungen können daher großflächige Veränderungen der Bodenatmung mit sich bringen, was wiederum die atmosphärische Konzentration des Treibhausgases CO_2 maßgeblich beeinflusst (KIRCHBAUM 1995).

Das CO_2 im Boden stammt hauptsächlich aus zwei Quellen, der heterotrophen (Bodenorganismen) und der autotrophen (Wurzel-)Atmung (DAVIDSON & JANSSENS 2006). Beide Prozesse werden durch die Klimaänderung über die Temperaturerhöhung und die Zu- oder Abnahme der Niederschläge sowie die CO_2–Konzentration der Atmosphäre interaktiv stark beeinflusst. Die Wurzelatmung und die mikrobiellen Ab- und Umbauprozesses werden auch durch das Wasserangebot limitiert. Es wird davon ausgegangen, dass der Temperaturanstieg vor allem die heterotrophe Atmung sehr stark stimuliert.

Während der Temperaturanstieg im allgemeinen den Streuabbau und die Umsetzungen organischer Bodenstoffe, die mikrobielle Aktivität und damit die CO_2-Emission fördert, kann er in Regionen, in denen die Sommerniederschläge stärker zurückgehen, über verminderte verfügbare Bodenwassergehalte den Streu- und Humusabbau und damit die CO_2-Freisetzung aus dem Boden limitieren. Auf Feuchtstandorten (Mooren) hängt die CO_2-Freisetzung vor allem vom Grundwasserstand ab, allerdings nicht in linearer Form (HÖPER 2007). So nimmt bereits bei geringer Grundwasserabsenkung die CO_2-Freisetzung zu.

Schließlich beeinflusst das Klima auch die Vegetation bzw. Bestockung, Fruchtarten und Fruchtfolgen und deren Biomasseproduktion mittels Temperatur, Niederschlag und Länge der Vegetationsperiode. Indirekt ergeben sich dadurch zum Teil massive Auswirkungen auf die Menge und Qualität der organischen Ausgangsstoffe bis hin zur Allokation der unter- und oberirdischen Biomasse, die wiederum indirekt die Bodenatmung beeinflusst. Es wird darüber hinaus vermutet, dass der steigende CO_2-Gehalt der Atmosphäre über den Düngungseffekt zu erweiterten C/N–Verhältnissen der Pflanzen-

Biomasse führen und damit über die Streuqualität den Streuabbau in Richtung einer höheren C-Akkumulation im Boden beeinflussen wird (MORGAN et al. 2001).

b) N_2O

Die wichtigsten Prozesse, die eine N_2O-Freisetzung aus Böden bewirken, sind die Nitrifikation und die Denitrifikation (DAVIDSON et al. 2000, SMITH, 1997, WRAGE et al. 2004). Die Steuerung der N_2O-Freisetzung aus Nitrifikation und Denitrifikation sowie der N_2O-Verbrauch innerhalb der Denitrifikation erfolgt nach DAVIDSON et al. (2000) auf zwei Ebenen. Die Raten beider Prozesse (Größe der Rohre in Abb. 3.14) werden maßgeblich vom Vorhandensein der Ausgangssubstrate (NH_4^+, NO_3^-) bestimmt. Faktoren, die das Verhältnis der Endprodukte (NO_3^-, N_2) zu den Anteilen in Form von N_2O freigesetzten Stickstoffs bestimmen, entsprechen der „Größe der Löcher in den Röhren“. Des Weiteren sind die Diffusionsbedingungen zwischen Boden und Atmosphäre entscheidend für die Höhe der N_2O-Freisetzung, da sie nicht nur den N_2O-Transport, sondern auch die Produktions- und Reduktionsraten beeinflussen.

Die Lachgasemissionen können sowohl von der Atmosphäre in den Boden als auch umgekehrt gerichtet sein (siehe Abb. 3.14). Etwa 65 % aller N_2O–Emissionen stammen aus den Böden (SMITH et al. 1997); dort laufen Prozesse ab, die die Flussrichtung zwischen Boden und Atmosphäre und die Flussrate bestimmen. Bei der Denitrifikation wird aus der Düngung oder Mineralisation von organischer Substanz stammendes Nitrat in nassen Böden oder Aggregaten unter anaeroben Bedingungen über Nitrit zu N_2 und partiell N_2O reduziert.

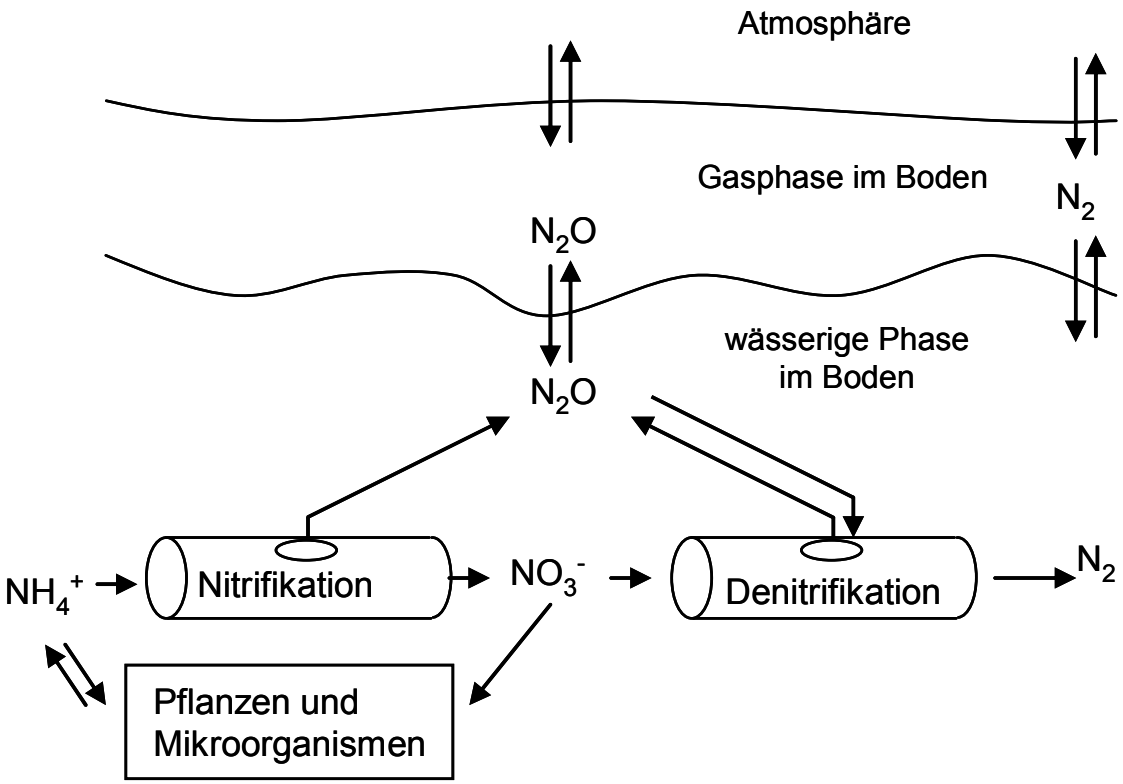


Abb. 3.14: Schematische Darstellung des konzeptionellen „Hole-in-the-pipe"-Modells. Es reguliert auf zwei Ebenen die N-Spurengasproduktion über die Nitrifikation und Denitrifikation zum einen durch die Bewegung von N durch die ,,Röhren" und zum anderen durch die ,,Löcher", durch die N-Spurengase strömen können. (verändert nach DAVIDSON et al. (2000))

Bei der Nitrifikation wird aus der Düngung oder der Mineralisation von organischen Stoffen stammendes Ammonium in Mikrokompartimenten des Bodens unter aeroben Bedingung zu Nitrit und Nitrat umgewandelt. Dabei kann ebenfalls Lachgas freigesetzt werden. Die Nitrifikation ist die biologische Oxidation von Ammonium über Nitrit zu Nitrat (siehe Abb. 3.15). Bei der chemoautotrophen Nitrifikation wird zunächst Ammonium (NH_4^+) über das Zwischenprodukt Hydroxylamin (NH_2OH) zu Nitrit (NO_2^-) oxidiert. Beide Schritte ermöglichen den chemoautotrophen Bakterien einen Energiegewinn unter gleichzeitiger Fixierung von Kohlenstoff aus CO_2. Die Oxidation von Ammonium zu Hydroxylamin ist eine sauerstoffabhängige Reaktion. Dagegen kann bei der Oxidation des Hydroxylamins zu Nitrit bei Sauerstoffmangel auch Nitrit als alternativer Elektronenakzeptor genutzt werden (RITCHIE & NICHOLAS 1972, OTTE et al. 1999). Im Rahmen dieser sogenannten Nitrifizierer-Denitrifikation kann das Nitrit zu NO und N_2O reduziert

werden. Die Nitrifikation ist insgesamt ein äußerst komplexer Prozess, der zahlreiche physikalische und chemische Bodenfaktoren und Prozesse einschließt. Als wichtigste Einflussfaktoren auf die Nitrifikation sind die Ammonium-Verfügbarkeit, der Sauerstoffpartialdruck und der pH-Wert des Bodens zu nennen (FIRESTONE & DAVIDSON 1989, NORMAN et al. 2008).

Die N_2O-Freisetzung aus der Nitrifikation steigt i.d.R. bei hohen Gehalten nitrifizierbaren Stickstoffs, hohen Temperaturen, hohen pH-Werten sowie steigender Wassersättigung des Porenraumes eines sonst gut durchlüfteten Bodens (BREMNER & BLACKMER 1981). FIRESTONE & DAVIDSON (1989) beobachteten bei sinkendem Sauerstoffpartialdruck, abfallenden pH-Werten sowie insgesamt sinkenden Nitrifikationsraten eine ansteigende N_2O-Freisetzung, die aus dem Anstieg des N_2O/NO_3-Verhältnisses in Böden resultierte. Der Anteil der nitrifikativen N_2O-Freisetzung an der nitrifizierten Stickstoffmenge lag nach Ammoniumdüngung zwischen 0,01 und 3 % (BREMNER & BLACKMER, 1981). FIRESTONE & DAVIDSON (1989) gehen davon aus, dass in der Regel weniger als 1 % des nitrifizierten Stickstoffs als N_2O freigesetzt wird.

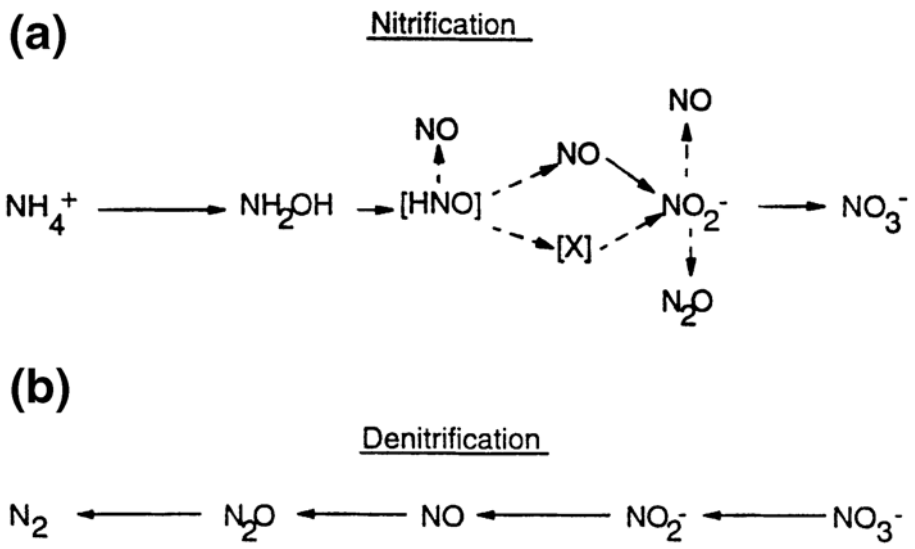


Abb. 3.15: Wege der chemoautotrophen Nitrifikation und der Denitrifikation (FIRESTONE & DAVIDSON 1989)

Unter Denitrifikation wird der mikrobielle Prozess verstanden bei dem Elektronen auf oxidierte Stickstoff-Verbindungen (Elektronenakzeptoren, z.B. NO_3^-) unter Bildung der gasförmigen Verbindungen NO, N_2O und N_2 übertragen werden (siehe Abb. 3.15). Eine Vielzahl von Einflussfaktoren bestimmt die Raten der Denitrifikation und das Verhältnis der Endprodukte N_2 und N_2O zueinander; als wichtigste sind der Sauerstoffpartialdruck, die Bodentemperatur, der Boden-pH-Wert und das Redoxpotential sowie die Verfügbarkeit von Kohlenstoffverbindungen und Nitrat zu nennen.

In der Regel führt ein sinkender Sauerstoffpartialdruck im Boden zu einem Anstieg der Denitrifikationsrate; dieser ist abhängig vom diffusiven Zufluss atmosphärischen Sauerstoffs sowie vom respiratorischen Verbrauch durch Pflanzenwurzeln und Mikroorganismen. Der diffusive Zufluss wiederum korreliert mit dem wassergefüllten Porenraumanteil des Bodens, da die Diffusionsgeschwindigkeit in wassergesättigten Poren um den Faktor 10.000 kleiner ist als in luftgefüllten Poren (HOLLER et al. 1996). Da der O_2-Verbauch der Bodenmikroorganismen durch ihre Aktivität bedingt wird, können besonders bei hohen Bodentemperaturen und großem Angebot an leicht zersetzbarer organischer Substanz anoxische Bereiche hoher denitrifikativer Aktivität im Boden auftreten. Andererseits kann in Böden unter anaeroben Bedingungen atmosphärisches N_2O zu N_2 reduziert werden, Böden wirken damit in einem komplexen System als Senke (CHAPUIS-LARDY et al. 2007); das Ausmaß und die regulierenden Faktoren hierzu sind allerdings erst wenig bekannt.

Unter wechselnden Verhältnissen aerober und anaerober Bedingungen, insbesondere zwischen Intra- und Interaggregatraum, kann die starke Empfindlichkeit des Enzyms N_2O-Reduktase gegenüber Sauerstoff zu erhöhtem Auftreten von N_2O als Endprodukt der Denitrifkation führen (KNOWLES 1982). Bei ansteigenden O_2-Partialdrücken wird die N_2O-Reduktase schneller als andere Enzyme der Denitrifikation gehemmt (CHAPUIS-LARDY et al. 2006). Andererseits wurde nach Einstellen anoxischer Verhältnisse (O_2 nur ungelöst gebunden vorhanden) zunächst ein Ansteigen der N_2O/N_2-Verhältnisse beobachtet. Offensichtlich musste unter diesen Bedingungen die N_2O-Reduktase erst aktiviert bzw. neu synthetisiert werden (DENDOOVEN & ANDERSON 1995). Hierdurch wird auch deutlich, dass die N_2O-Abgabe bei voller Wassersättigung des Porenraumes geringer ist als bei niedrigen Anteilen wassergefüllter Poren (DAVIDSON 1992). Bei hohem Nitratangebot wurde beobachtet, dass die Nitratreduktion zunächst nur bis zum N_2O

erfolgte (FIRESTONE et al. 1979). Ebenso kann der Denitrifikationsprozess unvollständig ablaufen und bereits beim NO bzw. N_2O statt beim N_2 enden, wenn bei ausreichender Nitratverfügbarkeit ein Mangel an leicht verfügbaren Kohlenstoffverbindungen vorliegt. In diesem Fall besteht geringer Bedarf an Elektronenakzeptoren, so dass auch hier das N_2O/N_2-Verhältnis ansteigt (FIRESTONE & DAVIDSON 1989). Weiterhin ist bei niedrigen Temperaturen und niedrigen pH-Werten mit hohen N_2O-Anteilen im Denitrifikationsgas zu rechnen (KNOWLES 1982). Bei Temperaturen unter 5 °C ist die Aktivität der N_2O-Reduktase stark gehemmt. Ebenso führen sinkende pH-Werte < 5 zu einer Inaktivierung der N_2O-Reduktase (GRANLI & BOOKMAN 1994). MENYAILO et al. (1997) stellten eine Abnahme des N_2O–Verbrauchs mit zunehmender Versalzung fest; sie gehen von einer Salzempfindlichkeit der N_2O-Reduktase aus, was selbst im humiden Klima bei starker Sommertrockenheit und Zufuhr löslicher Düngesalze fördernd auf die Bildung von Lachgas wirken kann. Die Vielzahl vernetzter Faktoren, die die Raten der Denitrifikation beeinflusst, führt auch zu extremen Spannen des N_2O-Anteils an der gesamten N-Freisetzung: GRANLI & BOOKMAN (1994) geben in ihrer Literaturübersicht mögliche Anteile zwischen 0 und 100 % an.

In Freilanduntersuchungen wurden die Bodentemperatur und der Bodenwassergehalt als die wichtigsten Treiber für die Variation von N_2O-Emissionen aus den Böden in stündlicher bis saisonaler Zeitskala identifiziert (GASCHE & PAPEN 1999; BUTTERBACH-BAHL et al. 2004). Der Effekt der Temperatur auf Boden-N_2O-Emissionen ist meistens direkt. Mit Zunahme der Temperatur erhöht sich die Enzymkinetik und folglich die metabolische Umsatzrate von Nitrifizierern und Denitrifizierern bis zu einem Optimum von ungefähr 30 - 35 °C (KESIK et al. 2005). Im Gegensatz zur Temperatur ist der Effekt der Bodenfeuchtigkeit meistens indirekt. Die Bodenfeuchte beeinflusst sehr stark die O_2-Diffusionsrate in den Boden und bestimmt damit ob ein Boden aerob oder anaerob ist (BRADY & WEIL 1999).

Der Sauerstoffstatus des Bodens bestimmt, ob der aerobe Prozess der Nitrifizierung oder der anaerobe Prozess der Denitrifikation vorherrscht. Obgleich beide Prozesse N_2O produzieren können, kann die Produktion von N_2O durch Denitrifikation ausgeprägter sein, da die Emissionsrate von N_2O während der Denitrifikation höher ist als während der Nitrifikation. Daher weist die Rate der Lachgasfreisetzung in Abhängigkeit von der Wassersättigung des Bodens eine Maximumkurve auf (HÖPER 1997). Die

optimale Bodenfeuchtigkeit für N_2O-Emissionen liegt etwa bei 60 – 65 % des wassergefüllten Porenraums. Ab einem Bodenfeuchtegehalt von > 70 – 80 % werden die N_2O-Emissionen stark verringert, da N_2O im Bodenprofil weiter zu N_2 reduziert wird (DAVIDSON et al. 2000). Jedoch kann unter bestimmten Umweltbedingungen (z.B. bei sehr hohen Bodennitratkonzentrationen) N_2O anstelle von N_2 das Endprodukt der Denitrifikation bilden (CONRAD 2002).

Einer der projizierten Einflüsse der erwarteten Klimaänderung ist die Absenkung des Grundwassers vor allem in den semiterrestrischen Feucht- und Nassstandorten Deutschlands (vor allem Hoch- und Niedermoore sowie Auenböden). Experimente zeigen, dass dieser Prozess zu erhöhten N_2O Emissionen führen wird (SMITH 1997). Die Ursache hierfür liegt in einem intensiveren organischen Stoffabbau und erhöhter N–Mineralisation bodenbürtiger Humusstoffe unter aeroberen Bedingungen begründet. Ergebnisse zahlreicher Untersuchungen auf terrestrischen Böden zeigen, dass der Effekt des Temperaturanstieges auf die N_2O-Emissionen im Allgemeinen positiv ist und dass der Steigungsgrad der Emissionen sehr steil sein wird, wenn dabei der Denitrifikationsprozess die N_2O-Hauptquelle ist. Die Ursache für die verstärkte Emission wird auf die erhöhte Bodenatmung zurückgeführt, welche eine Zunahme des anaeroben Volumens mit sich bringt und die durch die Temperaturerhöhung bedingte Zunahme der Denitrifikation verstärkt (SMITH 1997).

Unter den zukünftig zu erwartenden Umweltbedingungen kann ein Großteil der jährlichen N_2O-Emission auch während der Frost/Auftau-Zyklen stattfinden (TIETEMA et al. 1991, BURTON & BEAUCHAMP 1994, MEYER 1999). Solche Zyklen können in Zukunft in Abhängigkeit von der Klimazone mit mehr oder weniger Häufigkeit auftreten und so die Klimaerwärmung durch Rückkopplung positiv oder negativ beeinflussen. Es wird vermutet dass die Klimaänderung die Zyklen von Trocknen/Wiederbefeuchten verändern und so die Emission von Spurengasen verstärken kann (RUSER et al. 2008). Dem stehen jedoch Ergebnisse von MUHR et al. (2007) entgegen, die keinen signifikanten Einfluss auf die Höhe der Spurengasemission erwarten lassen.

Der mittlere Jahresniederschlag beeinflusst stark den Stickstoffkreislauf und damit das Ausmaß und die Quellen der N-Spurengasflüsse im System Boden-Atmosphäre über die Auswirkungen auf die Reduktionsbedingungen und das Angebot von Elektronendonatoren und -akzeptoren in Böden (HOLTGRIEVE et al. 2006). So können mit zuneh-

mendem Niederschlag die N_2O-Quellen von überwiegend durch Nitrifikation geprägten zu vorwiegend zu Denitrifikation gesteuerten Prozessen wechseln. Schließlich können auch Maßnahmen zur C-Sequestrierung die N_2O-Emissionen erhöhen und so das CO_2-Einsparpotential der zusätzlichen C-Festlegung im Humus überkompensieren (LI et al. 2005, RUSER et al. 2008). Durch die Sensibilität der N_2O- bzw. NO-produzierenden und -verbrauchenden Prozesse gegenüber den Umweltbedingungen ist zu erwarten, dass die Klimaänderung sehr stark das Ausmaß des N_2O- und NO-Austauschs zwischen den Böden und der Atmosphäre beeinflusst. Infolge der Komplexität dieser Rückkopplungsprozesse es jedoch schwierig, aus wenigen vorhandenen Feldstudien eine Schlussfolgerung über die zukünftige Entwicklung zu ziehen.

c) Methan (CH_4)

Böden beherbergen sowohl methanogene als auch methanotrophe Bakterien, so dass sie unter anaeroben Bedingungen Methan emittieren und unter aeroben Bedingungen Methan verbrauchen können (MEGRAW & KNOWLES 1987). Methanogene Bakterien sind extrem sensitiv zu Sauerstoff und potentiellen Sauerstofflieferanten, so dass die Methanproduktion im Boden nur unter anaeroben stark reduzierenden Bedingungen und bei Abwesenheit von Nitrat, Sulfat und Eisen(III)-oxid stattfindet. Daher spielen im wesentlichen Feuchtgebiete, die reich an organischen Substanzen sind, bei der Methanfreisetzung eine Rolle. Niedermoore gehören zu den wichtigsten Feuchtgebieten der Erde. In Deutschland gibt es $1{,}0*10^6$ ha Niedermoore (AUGUSTIN 2003), die diese Voraussetzung erfüllen.

Methanogene und methanotrophe Bakterien im Boden sind in der Regel gleichzeitig aktiv. Daher kann ein Methanfluss von Boden in die Atmosphäre (Quellfunktion) als auch in umgekehrter Richtung (Senkenfunktion) stattfinden. Die Flussrichtung und die Flussrate ergeben sich aus der Differenz zwischen der Methanogenese (durch methanogene Organismen) in den unteren, anaeroben Bodenschichten und der Methanoxidation (durch methanotrophe Organismen) in den oberflächennahen, aeroben Schichten (TOPP & PATTEY 1997; HÖPER 2007; Abb. 3.16). Daher können Böden sowohl als Quelle wie auch als Senke für Methan auftreten.

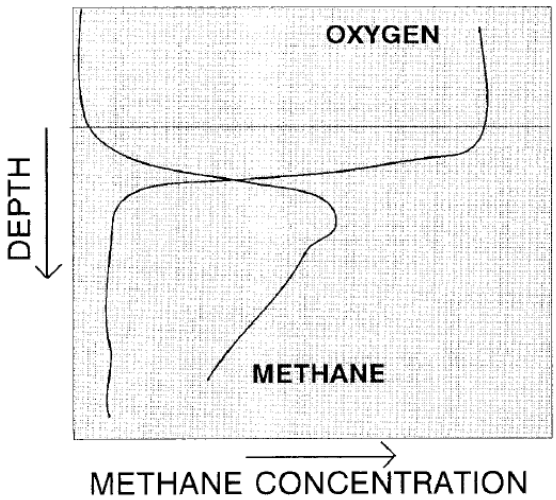


Abb. 3.16: Schematische Darstellung der von oxidierenden und reduzierenden Zonen in einem Bodenprofil (nach TOPP & PATTEY 1997)

Wie Feldstudien zeigen, ist die Methan-Emissionen in Feuchtgebieten von einer Reihe von Umweltfaktoren abhängen. Unter den Wichtigsten werden der Grundwasserstand, die Bodentemperatur und die Substratverfügbarkeit und Substratqualität aufgeführt (SHANNON & WHITE, 1994; MACDONALD et al. 1998). Aus einer Auswertung von Feldstudien konnten CHRISTENSEN et al. (2003) keine lineare Abhängigkeit der Methanemissionen vom Grundwasserstand feststellen. Wenn der Grundwasserstand innerhalb ca. 10 cm unter Geländeoberfläche liegt, wirkt die Bodentemperatur als Begrenzungsfaktor auf die Methanemission und die Sensitivität für den Wasserstand wird geringer. Unter diesen Bedingungen wird daher kaum noch Methan an die Atmosphäre abgegeben (DRÖSLER 2005); der Grundwasser-Flurabstand wird damit als Steuerungsfaktor und wird unmittelbar und kurzfristig durch die Niederschläge und mittelbar durch die Temperatur über die Verdunstung beeinflusst. Die Temperatur wirkt auf die Methanemissionen sowohl durch ihre direkte Förderung der mikrobiellen Aktivität als auch durch die Steuerung des Wasserstands über die Schneeschmelze und die Evapotranspiration; so korreliert die Methanfreisetzung im Jahresgang eng mit der Temperatur (HÖPER 2007). Da extreme Witterungsereignisse auch die CH_4-Quellen- und Senkenfunktion von Böden verändern, sind langfristige Trends bislang nicht prognostizierbar (FIEDLER et al. 2009).

Je nach den vorherrschenden klimatischen Verhältnissen wird sich die Vegetation aus unterschiedlichen Pflanzengesellschaften zusammensetzen und so auf die Substratmenge und -qualität sowie die Transportwege des Methans auswirken. So spielt beispielsweise auf Moorstandorten der Anteil von Pflanzen mit Aerenchym (Schilf) eine Rolle bei der Methanentgasung, da über diesen „Schornsteineffekt“ die Methanoxidation im oberen aeroben Bereich umgangen werden kann (HÖPER 2007).

Fazit:

Aufgrund der sehr komplexen und auch in der Grundlagenforschung noch nicht vollständig untersuchten Quellen- und Senkenfunktionen der Böden für klimarelevante Gase fehlen Daten über standörtlich und regional differenzierte Informationen, die Dynamik der Ein- und Austräge der Gase in Abhängigkeit von Witterungs- und Klimaschwankungen und vor allem auch Wechselwirkungen mit der Art und Intensität der Landnutzung. Entsprechende Informationen sind notwendig, um Modelle validieren und Prognosen über mögliche Trends und Gefährdungen in der Zukunft ableiten zu können.

Datenbedarf, Datenangebot, Dateneignung

Die Datengrundlagen aus Boden-Dauerbeobachtungsflächen, Waldbodenzustandserhebung und landwirtschaftlichen Feldversuchen liefern in der bisherigen Ausstattung keine direkten Parameter für die Abschätzung der Spurengasemissionen aus den bzw. den Spurengashaushalt der Böden. Es liegen zwar zeitlich begrenzte Studien von universitären und außeruniversitären Forschungseinrichtungen vor, bei denen die Spurengasemission auf Acker-, Grünland- und Waldstandorten in verschiedenen Regionen, Boden- und Klimastandorten sowie unterschiedlichen Bewirtschaftungsregimen erhoben wurden. Diese Aufnahmen sind aus wissenschaftlicher Sicht außerordentlich wertvoll, da sie wichtige Grundlagen über die Kausalität zwischen Boden und Emissionen bzw. Immissionen von klimarelevanten Gasen, zeitliche Trends zumindest einiger Jahre und Zusammenhänge mit Standort und Bewirtschaftung bzw. Bestockung liefern. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind jedoch nicht verallgemeinerbar und nicht auf die Fläche in ihrer Heterogenität und Bewirtschaftungsvielfalt übertragbar.

Es fehlen dazu vor allem die sensitiven Parameter, die für die in zeitlich hoher Dynamik ablaufenden Quellen-Senkenfunktionen steuernd wirken und über längere Perioden verlässliche und räumlich repräsentative Daten für verschiedene Standorte, Nutzungstypen, Nutzungssysteme und Klimaregionen liefern. Aufgrund der extrem hohen Komplexität der in Böden ablaufenden Freisetzungen können aus Einzeldaten keine aussagekräftigen Daten zur Freisetzung oder zum Verbrauch (source and sink) der Böden abgeleitet werden. Dazu sind für verschiedenartige Nutzungstypen und Nutzungssystemesowievalidierte Modelle notwendig.

Die Eignung vorhandener Daten aus Boden-Dauerbeobachtung, Waldbodenzustandserhebung und Feldversuchen ist deshalb in der bisherigen Form für die Prognose und Bewertung der Freisetzung klimarelevanter Gase als gering zu bewerten. Insbesondere fehlen zeitlich hoch aufgelöste Untersuchungen (systematische Messungen bzw. Dauerbeobachtungen unter definierten kausalen Bedingungen von Standort, Lage, Bewirtschaftungstyp, -form und -intensität; s.u.), zu den über das Jahr ablaufenden Freisetzungen und Fixierungen der gasförmigen Verbindungen sowie zur quantitativen Belegung der Quellen-Senkenfunktionen von Böden, um damit letztlich über die Klimarelevanz verlässliche Aussagen treffen zu können.

Eingangsdaten für Modellierungen

Für die Freisetzung klimarelevanter Gase liegen in der wissenschaftlichen Literatur bereits umfangreiche Ergebnisse aus Modellen vor. Die wichtigsten Modelle sind in Tabelle 3.26 dargestellt. Es zeigt sich, dass einige Modelle nur für Waldökosysteme und CO_2, landwirtschaftliche und Waldstandorte und CO_2, landwirtschaftliche Ökosysteme und Kohlendioxid, Methan und Lachgas, und nur die Modelle DNDC / Forest-DNDC (eingeschränkt EPIC für Acker und Grünland) eingesetzt werden bzw. validiert sind.

Tabelle 3.27 zeigt die Eingangspapameter des DNDC-Modells für die Dynamik klimarelevanter Gase in Böden. Die erforderlichen Daten zur Lage sind bei allen, zum Standortklima bei Grundangaben bei Level II und Boden-Dauerbeobachtungsflächen, zu sensitiven Angaben (N im Niederschlag) nur für Level II-Flächen verfügbar. Die benötigten Angaben zur Landnutzung sind i.d.R. nicht ausreichend.

Tab. 3.26: Modelle zur Dynamik klimarelevanter Gase in Böden (Auswahl)

Modelle	Landnutzung		Output-Parameter (Auswahl)		
	Acker u. Grünland	Wald	Biomasse	CO_2-C	CH_4, N_2O, NO
Yasso		x		x	
ROMUL		x		x	
RothC	x	(x)		x	
COUPMODEL (SOILN)	x	x	x	x	
CENTURY	x	x	x	x	
CENTURY/DayCent)	x	x	x	x	x
Forest-DNDC		x	x	x	x
DNDC	x		x	x	x
EPIC	x		x	x	x*

* nur beschränkt, externe Erweiterung notwendig

Die Werte für die Basiseigenschaften der im Modell geforderten physikalischen und chemischen Stammeigenschaften sind sowohl für die Level-II-Standorte wie auch die Dauerbeobachtungsflächen verfügbar. Hingegen werden in keiner der Monitoringtypen die erforderlichen Angaben zur Partitionierung von C_{org} erhoben. Zudem wird in den meisten Modellen die Partitionierung der organischen Boden-C-Vorräte (und damit in einigen Modellen auch die N-Pools) in konzeptionelle Pools vorgenommen (leicht, mittel, schwer abbaubar), die nicht direkt messbar sind. Eine Bestimmung der Pool-Verteilung erfolgt in solchen Modellen zumeist iterativ oder über eine Vor-Initialisierung (spin-up runs). Dieses Vorgehen bedingt erhebliche Unsicherheiten, so dass die Quantifizierung der komplexen Dynamik klimarelevanter Spurengase in Böden in kausaler Hinsicht unter verschiedenen Nutzungstypen, für die Übertragung kausaler, zeitlich hoch aufgelöster Daten in die Fläche mittels Regionalisierungsmethoden nach wie vor mit großen Unsicherheiten behaftet ist.

Tab. 3.27: Eingangsparameter für das DNDC-Modell (Denitrification-Decomposition-Model)

Parameter für die Anwendung von DNDC	Datengrundlagen
1. Geographische Lage (Breitengrad)	alle
2. Klima (in Tagesauflösung)	
▪ Temperatur (Minimum, Maximum, Mittel) ▪ Niederschlag ▪ Strahlung ▪ Windgeschwindigkeit	Level II/ Intensiv-BDF, LWF
▪ N-Konzentration im Niederschlag (mg N/l oder ppm)	Level II/ Intensiv-BDF
▪ Atmosphärischer Hintergrundwert für NH_3-Konzentration (µg N/m^3) (0.06) ▪ Atmosphärischer Hintergrundwert für CO_2-Konzentration (ppm) ▪ Steigungsrate der atmosphärischen CO_2-Konzentration (ppm/yr)	keine Erhebung im Rahmen der Bodenmess-programme
3. Boden und Landnutzung	
3.1. Landnutzung	BDF, LWF, (nicht ausreichend)
3.2. Bodeneigenschaften	
- Bodentextur - Trockenrohdichte (g/cm^3) des Oberbodens (0 – 10 cm) - pH-Wert des Oberbodens - Tongehalt (0-1) - Feldkapazität (0 – 1): (falls die Bodenart angegeben ist, wird der Wert abgeschätzt) - Welkepunkt (0 – 1) - Makroporen-Flüsse und Bypass-Flüsse (ja / nein) - Grundwasserstand 0 – 50 cm (ja/nein) - Tiefe der Stauschicht (cm)	BZE, Level II, BDF, LWF
- NO_3^- u. NH_4^+ Konzentration im Oberboden (mg N/kg) - Mikrobielle Aktivität (0 – 1)	Intensiv-BDF, LWF
- C_{org} im Oberboden (0-5cm) (kg C/kg) - Mächtigkeit des Oberbodens mit einem homogenen C_{org}-Gehalt (m) - C_{org}-Abnahmerate mit der Tiefe unterhalb des Oberbodens (-5.0 – 5.0)	BZE, Level II, BDF, LWF
Partitionierung oder Re-Definition von Corg (oder Default)	
- Fraktion von sehr labilen Streupools (V.l. litter) - Fraktion von labilen Streupools (L. litter) - Fraktion von resistenten Streupools (R. litter) - Fraktion von aktivem Humus) – Pools (Humads) - Fraktion von passiven Humuspools (Humus)	Bisher keine Fraktionierung*

Räumliche Aussagen zu Bodenzustand und dessen Veränderungen

Während der letzten Jahre wurden Anstrengungen unternommen, die aus punktförmig gewonnenen Gesetzmäßigkeiten der Freisetzung und Bindung klimarelevanter Gase unter Nutzung von Transferfunktionen auf die Fläche zu übertragen bzw. zu berechnen. So standen projektierte Veränderungen mineralischen Boden-C in Acker- und Grünland (SMITH et al. 2005), zukünftige Szenarien der N_2O- und NO-Emissionen (KESIK et al. 2006), die europäische C-Bilanz in Ackerkulturen, oder schwerpunktmäßig das Potential von Wäldern und Mooren im Zentrum der Modellierungen (FREIBAUER et al. 2009). Diese Veröffentlichungen zeigen Größenordnungen und mögliche Trends, sie besitzen jedoch aufgrund der geringen Validierung und dem Fehlen geeigneter Ansätze einer realistischen Regionalisierung nur eine geringe Aussageschärfe (s.o.).

Empfehlungen für künftige(s) Monitoring und Erhebungen

- Zur Erfassung von Spurengasen wird die Etablierung und Instrumentierung von ausgewählten, regional repräsentativen Standorten zur kontinuierlichen Messung der Spurengasdynamik unter Berücksichtigung bereits etablierter Standorte (Niedersachsen, Hochschulen, außeruniversitäre Forschung) im Rahmen einer komplementären Strategie empfohlen.
- Direktmessung der Spurengasfreisetzung von relevanten Bodengesellschaften und Landnutzungstypen: Flächenrepräsentativität der Aufnahmeflächen hinsichtlich der räumlichen Verteilung und Bodenregionen/-typen, Landnutzungstypen und Bodenbedeckung
- Regionalisierung der Messwerte: Parametrisierung der wesentlichen Steuerungsgrößen in Abhängigkeit flächendeckend digital verfügbarer Daten bzw. unter Nutzung der Fernerkundung
- Modelluntersuchungen zum Einfluss des Klimawandels auf die Spurengasemission unter Nutzung von validierten Modellen

Forschungsbedarf

1. Direktmessung der Spurengasfreisetzung von Mooren unter Acker, Forst, auf renaturierten Standorten u.a. auch nach Abtorfung (mit zeitlicher Dynamik)
2. Regionalisierung der Messwerte: Parametrisierung der wesentlichen Steuerungsgrößen in Abhängigkeit flächendeckend digital verfügbarer Daten bzw. unter Nutzung der Fernerkundung
3. Konzeptionelle Versuche zur Auswirkung von Klimawandel auf Spurengasemissionen in Form eines multifaktoriellen Designs
4. Langzeitwirkungen atmogener N-Deposition auf ökosystemare C- und N-Umsetzungen mit besonderer Berücksichtigung der C-N-Interaktionen in Böden bei Klimawandel (Stabilität der C_{org}-/N_{org}-Fraktionen in Böden)
5. Entwicklung und Förderung klimaschonender Verfahren der Moornutzung (Erlen-, Schilf-, Sphagnenkultur) und Modelluntersuchungen zum Einfluss des Klimawandels auf die Torfakkumulation
6. Direktmessung der Spurengasfreisetzung und Kohlenstoffbilanzen für hydromorphe Böden unter Grünland und nach Grünlandumbruch unter Berücksichtigung von Entwässerungsmaßnahmen
7. Innovative, schnell durchführbare Bestimmung der verschiedenen C-Fraktionen in Böden (z.B. Infrarotmethoden)

Bisher laufende kontinuierliche Monitoringaktivitäten zu Spurengasmessungen

- Höper, LBEG, Niedersachsen: Emission klimarelevanter Spurengase aus Feuchtgebieten und Ackerökosystemen
- Höglwald: Austausch klimarelevanter Spurengase unter verschiedenen Waldbewirtschaftungsformen (längste Zeitreihe weltweit, langfristiges Messkonzept)
- TERENO (Programm der Helmholtz-Gemeinschaft Deutscher Forschungszentren, Karlsruhe, Garmisch-P., Jülich, Leipzig, München): langfristig angelegtes Messprogramm zu Änderungen des C/N/H_2O Austauschs von Grünland unter Klimaänderungen (vergleichbares Konzept wird an anderen Standorten im Rahmen des TERENO-SoilCan Ansatzes verfolgt)

- DBU-Vorhaben CARBSTOR (2008 – 2009)
- BMBF-Projekt Klimaschutz – Moornutzungsstrategien (2007 – 2009)

3.4 Zusammenfassendes Fazit über die Eignung von Daten aus Bodenmonitoring und Bodenzustandserhebung für die Bearbeitung bodenspezifischer Themenbereiche

ARGE BOKLIM

Im vorhergehenden Kapitel 3.3 wurde analysiert, inwieweit die Daten aus Bodenmonitoring und Bodenzustandserhebung für die Bearbeitung der folgenden klimawandelrelevanten Themenbereiche geeignet sind:

- Nichtstofflicher Bodenzustand und –prozesse - Erosion und Verdichtung
- Bodenwasserhaushalt
- Bodenstoffhaushalt, stoffliche Bodenbelastungen
- Bodenmikrobiologie
- Bodenzoologie
- Klimarelevante Gase

Aspekte der Landnutzung sind Bestandteil der themenübergreifenden Zusammenfassung in Kapitel 3.2.

Die kritische Prüfung des Datenangebots sowie der Dateneignung erfolgte aufbauend auf einer themenspezifischen Betrachtung der klimawandelbedingten Auswirkungen auf den Boden und deren Folgen. Diese Arbeiten sind die Grundlage für nachfolgende Empfehlungen für zukünftige Monitoring- und Datenerhebungsaktivitäten.

Die vorgenommene Analyse erbringt den Nachweis, dass die Daten aus Bodenmonitoring und Bodenzustandserhebung eine Vielzahl wertvoller Informationen zur Beantwortung von Fragen der Wirkung von Klimaänderungen auf den Bodenzustand und die Bodenfunktionen liefern. Sie leisten damit einen wichtigen Beitrag für die langfristigen Arbeiten des Bundes und der Länder zur Klimaanpassung. Sie zeigt jedoch auch, dass die einzelnen Mess- und Erhebungsprogramme weiter angepasst und modifiziert wer-

den müssen, um den Anforderungen im Hinblick auf Datenqualität, -belastbarkeit, -vollständigkeit (Parameterspektrum und Messhäufigkeit) sowie Flächen- und Nutzungsrepräsentanz im vollem Umfang gerecht zu werden. Tabelle 6.1 gibt einen zusammenfassenden Überblick über die themenspezifischen Empfehlungen zur Anpassung der Programme des Bodenmonitoring und der Bodenzustandserhebung an die Anforderungen der Klimafolgenforschung und Klimaanpassung.

Die maßgebliche Funktion der dauerhaft eingerichteten Programme besteht darin, belastbare Auskünfte über die Veränderungen des Bodenzustands zu geben. Darüber hinaus fungieren sie als Frühwarnsystem, in dem sie die Konsequenzen klimawandelbedingt veränderter Randbedingungen für Bodenprozesse und damit verbundene Beeinträchtigungen von Bodenfunktionen nach § 2 BBodSchG aufzeigen.

Insbesondere das Monitoring (Boden-Dauerbeobachtung, ICP Level II) und langfristige Feldexperimente (Dauerversuche) können dazu beitragen, langfristige Veränderungen des Bodenzustands bzw. der Bodenfunktionen infolge des Klimawandels mit konkreten Daten zu dokumentieren und nachzuweisen (Beweissicherung).

Die Tabelle 3.28 fasst zusammen, inwieweit die Daten der Programme des Bodenmonitoring und der Bodenzustandserhebung sowie weiterer Messaktivitäten dazu beitragen können, den Bodenzustand einmalig (bzw. ggf. periodisch wiederholt) zu erheben (Z), langfristige und durch den Klimawandel bedingte oder beeinflusste Veränderungen zu beobachten (V) oder Daten für die Kalibrierung und -validierung von Simulationsmodellen für Bodenveränderungen zur Verfügung zu stellen (M).

Parameter zur Messung klimabedingter Änderungen des Bodenzustands werden im Hinblick auf den Wärme- und Wasserhaushalt, den Stoffhaushalt, die Bodenmikrobiologie, die Bodenfauna und die Bodenverdichtung in Programmen des Bodenmonitoring und der Bodenzustandserhebung und weiteren bundesweiten Messaktivitäten untersucht, wobei jedoch nicht alle jeweils relevanten Messgrößen vollständig zur Verfügung stehen. Die Erhebung von Parametern zur Freisetzung von Spurengasen und zur direkten Messung von Bodenabträgen durch Erosion erfolgt derzeit nur vereinzelt bzw. nicht im Rahmen der betrachteten Programme. Für die Landnutzung wichtig sind die für die Bodeneigenschaften und Bodenprozesse bestimmenden Informationen, die aus Dauerfeldversuchen (auch künftig) gewonnen werden können und daraus resultierende

Parameter. Diese finden sich in der Zusammenstellung der für die Bodenprozesse und die Degradation erforderlichen Parameter wieder (siehe Kap. 3.3).

Tab. 3.28: Eignung von Messdaten für die Erhebung und Beobachtung des Bodenzustands unter veränderten Klimabedingungen

Thema	**Bodenmonitoring und Bodenzustandserhebung**					**Weitere Messaktivitäten**		
	ICP Level I/ BZE Wald	**ICP Level II**	**Basis-BDF**	**Inten-siv-BDF**	**LWF**	**DWD-Ag-rarme-teoro-logie**	**Feld-lysi-meter**	**UPB**
Nichtstoffl. Boden-zustand	-	-	-	*(Z,M)*	-	-	-	-
Bodenwas-serhaushalt	-	Z,V,M	Z, V	Z,V,M	*(Z,V,M)*	Z,V,M	V,M	-
Stoffhaus-halt, stoffl. Bodenbe-lastung	Z,V	Z,V,M	Z, V	Z,V,M	Z,V,M	-	V,M	Z, V
Bodenmik-robiologie	-	-	Z,V,M	Z,V,M	*(Z,V)*	-	-	-
Boden-zoologie	*(Z,V)*	-	Z,V,M	Z,V,M	*(Z,V)*	-	-	-
Klima-relevante Gase	-	-	-	-	-	-	-	-
Land-nutzung	Z	Z,M	Z,V	*(Z,V,M)*	Z,V,M	-	V,M	-

Z = Einmalige Erhebung des Bodenzustands

V = Beobachtung langfristiger Veränderungen des Bodenzustands

M = Kalibrierung und -validierung von Simulationsmodellen

( ) = deutlich eingeschränkte Eignung wegen geringer Standortzahl oder methodischen Defiziten

Um Wirkungen der erwarteten Klimaänderungen auf die Böden prognostizieren zu können, sind vertiefte Untersuchungen der zugrunde liegenden Prozesse unbedingt erforderlich. Für derartige Prozessbetrachtungen können Daten aus bodenbezogenen Messprogrammen eingesetzt werden. Programme, in denen Stoffflüsse gemessen

werden (Intensiv-BDF, ICP Level II, Feldlysimeter), bieten Möglichkeiten zur Berechnung von standortbezogenen Stoffbilanzen und lassen Rückschlüsse auf An- oder Abreicherungen von Stoffen im Boden zu. Prozessorientierte Studien zum Wasserhaushalt werden insbesondere anhand der Intensiv-BDF und ICP Level II-Flächen, aber auch vertieft mittels Feldlysimetern durchgeführt.

Erkenntnisse und Messdaten aus Forschungsprojekten wie z.B. TERENO, CarboEurope ergänzen die Monitoring- und Erhebungsprogramme, indem sie experimentelle Erkenntnisse und Methoden zur Modellierung von Bodenprozessen liefern. Zu verbessern ist insbesondere die Beschreibung von Prozessen und Interaktionen (System Boden–Vegetation–Atmosphäre) in Bezug auf steigende atmosphärische CO_2-Gehalte, Pflanzenwachstum und Verdunstung.

Methodische Ansätze für räumliche Betrachtungen sind für Aussagen zur Bodenerosion, zu den Stoffgehalten, -vorräten und zu Wasserhaushaltsgrößen vorhanden. Sie, fehlen jedoch für Angaben zur Bodenmikrobiologie, zur Bodenfauna und zur Freisetzung von Spurengasen. Speziell für die Bodenfauna sind die Verknüpfungsregeln zur Übertragung von standortbezogenen Messergebnissen in die Fläche derzeit noch Expertenwissen, das nicht in einem bundesweit validierten und abgestimmten Regelwerk vorliegt.

Räumliche Informationen zu möglichen Wirkungen von Klimaänderungen auf die Böden liegen derzeit in bundesweitem Maßstab nur für bestimmte Bodengefährdungen vor (Bodenerosion durch Wasser). Es fehlen bisher übergreifende räumliche Abschätzungen möglicher Wirkungen von Klimaänderungen auf den Abbau organischer Substanz, den Bodenwasserhaushalt, die biologische Aktivität, die Zusammensetzung der Bodenlebensgemeinschaft, die Freisetzung klimarelevanter Gase und die Schadstoffmobilität. Auf regionaler Ebene liegen jedoch in vielen Bundesländern bereits flächenhafte Aussagen zu möglichen klimabedingten Veränderungen von Böden oder bodenbezogenen Prozessen vor, z.B. zu Erosion und Beregnungsbedarf.

Inwieweit die Messstandorte der Programme des Bodenmonitoring und der Bodenzustandserhebung für eine Bewertung von Fragen des Klimawandels geeignet sind, hängt vom Untersuchungsspektrum und der Untersuchungsmethodik ab. Entscheidend ist auch, ob alle Landschaften und besonders empfindliche Standorte wie z.B. Feucht-

gebiete abgedeckt sind. Datendefizite bestehen aufgrund einer eingeschränkten Eignung und der konzeptioneller Unterschiede der einzelnen Programme (z.B. Parameterspektrum, Messhäufigkeit, Flächen- und Nutzungsrepräsentanz). Organisatorische Gründe wie z.B. die fehlende Koordinierung der landwirtschaftlichen Dauerfeldversuche führen zu besonderen Schwierigkeiten. Ein Defizit für potenzielle Nutzer der Bodendaten ist, dass Informationen über die Daten gegenwärtig uneinheitlich sind und an vielen Stellen verteilt vorliegen und es nicht immer eine harmonisierte, zentrale Datenhaltung gibt. Ein Zugang zur Gesamtheit der vorhandenen Bodendaten ist daher derzeit nicht gewährleistet, d.h. hinsichtlich der Bereitstellung von (Meta-) Daten besteht ein Verbesserungspotenzial. Hinzu kommen Probleme mit der Aussagegenauigkeit von Messdaten.

Effiziente länder- oder messnetzübergreifende Auswertungen zur Klimafolgenabschätzung und zur Entwicklung von Anpassungsstrategien an den Klimawandel lassen sich erst dann durchführen, wenn die in Kapitel 3.1.5 zusammengefassten Anforderungen an Messstandorte, an Untersuchungskonzept und -umfang sowie an Dokumentation, Datenhaltung und -verfügbarkeit erfüllt sind. Darüber hinaus bedarf es der Umsetzung der in Kapitel 6.1 themenübergreifend und in Tabelle 6.1 konkret und themenspezifisch dargelegten Handlungsempfehlungen für die Anpassung der Programme aus Bodenmonitoring und der Bodenzustandserhebung an die Anforderungen der Klimafolgenforschung – und –anpassung.

3.5 Kosten und Nutzen der Bereitstellung von Daten aus Bodenmonitoring und Bodenzustandserhebung

C. Kaufmann-Boll

In Deutschland stehen die Aktivitäten der Bodenzustandserhebung, der Boden-Dauerbeobachtung und der landwirtschaftlichen Dauerfeldversuche in den meisten Bundesländern und auf Bundesebene unter einem politischen Begründungsdruck, da in der Regel Vorgaben zur Kostenreduzierung gemacht werden und sowohl bundesweit als auch auf Europäischer Ebene keine ausdrückliche rechtliche Verpflichtung zur

Überwachung des Bodenzustands existiert. Hinzu kommt das Problem, dass Aussagen zu Veränderungen des Bodenzustands nur auf Grundlage langfristiger Messperioden möglich sind, da sich die Bodenprozesse wie z.B. Verwitterung und Mineralneubildung, Zersetzung und Humifizierung in sehr großen Zeiträumen vollziehen. Die Bildung von einem Meter Boden dauert je nach Ausgangsgestein und Einflussfaktoren mehrere tausend Jahre. Darüber hinaus erschwert eine unzureichende methodische Einheitlichkeit die bundesweite Datenauswertung und Berichterstattung (vgl. Kap. 3.2.6).

Das BUNDESAMT FÜR UMWELT DER SCHWEIZ (2007) schätzt, dass in Mitteleuropa der Kostenanteil für Bodenbeobachtung weit unter einem Prozent der insgesamt für den Umweltschutz aufgewendeten Kosten liegt. Vor dem Hintergrund, dass die Ergebnisse der Messaktivitäten als Grundlagen für die Begründung, Planung und Erfolgskontrolle von z.B. klimarelevanten Bodenschutz-Maßnahmen dienen, ist dieser Anteil erstaunlich gering. Es fehlt das Bewusstsein, dass ein unzureichendes Bodenmonitoring zu verspäteten und falschen Signalen an politische Entscheidungsträger führt. In Konsequenz dieser falschen Signale können hohe volkswirtschaftliche Folgekosten für Umwelt- oder Anpassungsmaßnahmen entstehen.

Noch deutlicher wird das Problem bei der Betrachtung folgender Zahlen: Laut Angaben der Münchener Rück von 2002 stiegen die ökonomischen Schäden extremer Wetterereignisse in den letzten drei Jahrzehnten um den Faktor fünfzehn. Erste Schätzungen gehen davon aus, dass die deutsche Volkswirtschaft in den kommenden 50 Jahren nur für die Behebung von Klimaschäden ca. 3 % des Bruttosozialprodukts, das sind bis zu 800 Mrd. US-$, aufwenden muss. (KEMFERT 2007). Entscheidungen zum Klimaschutz und zur Klimaanpassung sind demnach zukünftig in einem großen Rahmen gefragt. Hier muss eine klare Positionierung erfolgen, wie belastbar die Datenbasis sein soll, auf denen die Entscheidungen aufbauen.

Eine fundierte Analyse wirtschaftlicher Aspekte der Aktivitäten zur Überwachung und Erhebung des Bodenzustands steht noch aus und war nicht Gegenstand des BOKLIM-Vorhabens. Gleichwohl werden an dieser Stelle verfügbare Angaben zu den betrachteten Programmen aufgeführt (siehe Kasten). Die Kosten von Bodenmonitoring und Bodenzustandserhebung setzen sich aus den Kosten für die Planung und Organisation, Probenahme, Analytik, Auswertung und Berichterstattung zusammen. Die Höhe der Kosten hängt ab von der Anzahl der Untersuchungsstandorte, der Länge der Zufahrts-

strecken, der Untersuchungshäufigkeit, der Probenzahl, der Anzahl und Art der Analysen sowie von Zielen und Umfang der Datenauswertungen und der Berichterstattung. Es wird eingeschätzt, dass der größte Kostenanteil für die Erhebung der Daten anfällt, während Datenhaltung und Analyse sowie Koordination und Steuerung geringere Anteile aufweisen.

Um die anfallenden Kosten zu reduzieren, werden Einsparpotenziale gesucht, die zu einer Reduzierung des Untersuchungsumfangs führen. Aufgrund fehlender Finanzierungsmöglichkeiten hat sich z.B. die Zahl der Dauerfeldversuche in Deutschland in den vergangenen Jahren erheblich reduziert und in einigen Bundesländern wird die Schließung bzw. Reduzierung der Boden-Dauerbeobachtungsstandorte diskutiert oder ist bereits erfolgt (z.B. Intensiv-BDF in Bayern).

Beispiel: Kosten Boden-Dauerbeobachtung
Hinsichtlich der von den Ländern zu finanzierenden Kosten stellte die LABO in einem Bericht von 2002 je Basis-BDF 8.000 € bis 15.000 € pro Fläche für die Flächeneinrichtung und Grundinventur (Flächenauswahl, Klärung der Nutzungs- und Betretungsrechte, Vermessung und Vermarkung, bodenkundliche Probenahme und -analytik) sowie mittlere jährliche Betriebskosten in Höhe von ca. 1.500 € pro BDF-Standort (ohne Personalkosten) fest. Für Intensiv-BDF können schätzungsweise jährliche Kosten von 40.000 bis 50.000 € bei monatlicher Probenahme angesetzt werden, wobei diese Zahlen nur einen groben Orientierungsrahmen darstellen. Tatsächliche Kosten können hiervon aufgrund der Preisentwicklung und schlechter Vergleichbarkeit wegen unterschiedlicher Preisermittlungsverfahren abweichen (BOVA 2008).

Beispiel: Kosten Landwirtschaftliche Dauerfeldversuche
Die Kosten für die Durchführung der landwirtschaftlichen Dauerfeldversuche betragen, nach vorliegenden Erfahrungswerten, im Durchschnitt 28.000 € je Hektar, einschließlich der wichtigsten, obligatorisch notwendigen Analysen. Bei rd. 30 ha Versuchsfläche insgesamt wären dies 840.000 €. Für Leitung und Organisation des Gremiums müsste ein Wissenschaftler vorgesehen werden. Einschließlich einiger Aufwendungen für Material, Dokumentation und Reisekosten würden die Kosten unter 900.000 € jährlich bleiben. Da es sich um Aufgaben handelt, die jeweils über die Aufgaben der einzelnen Einrichtungen hinausgehen und insbesondere die Universitäten große finanzielle Probleme haben, ist eine zentrale Finanzierung, oder zumindest Teilfinanzierung, notwendig (KÖRSCHENS 2006).

Konsequenzen eines Wegfalls oder einer Reduzierung von Messaktivitäten sind:

- Es können keine belastbaren Aussagen für durch Klimaänderungen zu erwartende Beeinträchtigungen der Bodenfunktionen und damit verbundenen Wirkungen auf die Landnutzung getroffen werden.
- Die Möglichkeiten einer systematischen Beweissicherung und Erfolgskontrolle von Maßnahmen entfallen.
- Wichtige Aussagen zu Klimawandel, Klimafolgen und -anpassung können nicht mit Messdaten belegt werden (z.B. Veränderung von Humusgehalten, Beitrag der Böden zu THG-Emissionen, vgl. Tab. 3.7).

- Modellszenarien bleiben unscharf.

Bei nicht bundesweit und koordiniert betriebenen Mess- und Auswertungsansätzen ist zudem ein hoher personeller und finanzieller Aufwand durch Überschneidungen (Doppelarbeit) zu erwarten.

Handlungsempfehlungen

- Sicherstellung der beim Bund und in den Ländern sowie bei Forschungseinrichtungen und Universitäten langfristig angelegten Programme des Bodenmonitoring und der Bodenzustandserhebung im Hinblick auf die Erfordernisse eines auf den Klimawandel bezogenen Bodenmonitorings. Nur auf dieser Grundlage ist es möglich, die aus dem Klimawandel resultierenden Veränderungen des Bodenzustands und der Bodenqualität mit konkreten Daten und belastbaren Zeitreihen zu dokumentieren sowie eine Erfolgskontrolle der Maßnahmen zu gewährleisten.
- Die Daten aus Bodenmonitoring und Bodenzustandserhebung liefern eine Vielzahl wertvoller Informationen zur Beantwortung von Fragen der Wirkung von Klimaänderungen auf den Bodenzustand und die Bodenfunktionen. Sie leisten damit einen wichtigen Beitrag für die langfristigen Arbeiten des Bundes und der Länder zur Klimaanpassung. Die einzelnen Mess- und Erhebungsprogramme müssen jedoch weiter angepasst und modifiziert werden, um den Anforderungen im Hinblick auf Datenqualität, -belastbarkeit, -vollständigkeit (Parameterspektrum und Messhäufigkeit) sowie Flächen- und Nutzungsrepräsentanz im vollem Umfang gerecht zu werden (siehe Kapitel 6.1, Tabelle 6.1).
- Im Rahmen dieses Forschungsprojekts wurden die Aktivitäten des Bodenmonitorings und der Erfassung des Bodenzustands erstmals bundesweit und messnetzübergreifend betrachtet. Es liegen Handlungsstrategien für die künftige effiziente Nutzung der Mess- und Erhebungsaktivitäten zur Klimafolgen- und anpassungsforschung vor und es werden Vorschläge zur Verbesserung der Verfügbarkeit für Bodendaten unterbreitet (siehe Kapitel 6.2). Diese gilt es nachfolgend umzusetzen.

- Unter dem Aspekt der Kosteneffizienz sollte die Zusammenarbeit zwischen den an der Gewinnung und Nutzung von Bodendaten beteiligten Institutionen und Akteuren verbessert und Synergiepotenziale genutzt werden. Konkrete Schnittstellen und Handlungsempfehlungen für Information und Kommunikation weist der vorliegende Bericht in den Kapiteln 6.1 und 6.3 aus.
- Eine systematische messnetzübergreifende Untersuchung der Kosten der in Deutschland betriebenen Messprogramme würde Transparenz schaffen und eine Beurteilung von Einsparpotenzialen sowie eine Prognose des künftig entstehenden Mehraufwandes ermöglichen. Dieser kann dann mit dem Zugewinn an Aussagekraft der Datensätze in Beziehung gesetzt werden kann (siehe auch Kap. 6.1).

4 DATENBEREITSTELLUNG UND EFFIZIENTE NUTZUNG VON BODEN-DATEN

W. Kappler; R. Baritz

Bodendaten werden in der Klimasystemforschung und in der Klimafolgen- und -anpassungsforschung für Forschungsprojekte und Beratungsaufgaben im Kontext Klimawandel (Folgen des Klimawandels, Anpassungsstrategien) benötigt. Bedarf besteht sowohl an regionalisierten und über die Tiefe differenzierten Daten zu Bodeneigenschaften und Daten zur Landnutzung und Vegetation als auch an Beobachtungsdaten zu Bodenfeuchte und -temperatur, Grundwasserflurabstand sowie zu chemischen Bodeneigenschaften (vgl. Kap. 3.1.2). Derzeit sind diese „klimarelevanten Bodendaten“ noch nicht in ausreichendem Maße öffentlich bekannt und verfügbar.

Um die benötigten Bodendaten effektiv nutzbar zu machen, müssen deren Inhalte und Zugangsmöglichkeiten bekannt sein. Datenerfassung, Bereitstellung und Erläuterungen müssen sich einerseits an potenziellen Nutzerinteressen orientieren, und andererseits so präsentiert werden, dass Nutzer die optimalen Daten für den entsprechenden Verwendungszweck finden können. Gleichzeitig dürfen keine unzumutbaren Aufwände bei den Datenbesitzern und –anbietern (-providern) entstehen.

Ein größerer Bekanntheitsgrad, die leichtere Abrufbarkeit, nutzerfreundliche Zugänge sowie die mehrfache Nutzung der Bodendaten tragen zu einer deutlichen Wertsteigerung der Daten bei. Neben den klimabezogenen Anwendungsbereichen ergibt sich hier auch ein direkter Nutzen für den Einsatz von Bodendaten im Bodenschutz und für Planungsaspekte und umweltpolitisch aktuelle Themen, wie z.B. nachhaltige Landnutzung oder Hochwasserschutz (vgl. Kap. 3.2.1). Berichterstattungsvorgänge und Öffentlichkeitsarbeit werden effizienter und es wird den gesetzlichen Verpflichtungen des Umweltinformations- und des Geodatenzugangsgesetzes Rechnung getragen. Nicht zuletzt bieten sich Chancen für die Aufwertung der Daten aus den oft unter finanziellem Druck stehenden Programmen des Bodenmonitoring und der Bodenzustandserhebung.

Wichtige Begriffe und Abkürzungen zum Thema Datenbereitstellung

bBIS	Bundesweites Bodeninformationssystem des UBA
CSW	Catalogue Service Web, → OGC
EMF	Environmental Monitoring Facilities (INSPIRE Annex III Thema)
ESBN	European Soil Bureau Network
ESDI	European Spatial Data Infrastructure – Europäische Geodateninfrastruktur
ESDAC	European soil data centre http://eusoils.jrc.ec.europa.eu/library/esdac/esdac.html
FISBo BGR	Fachinformationssystem Boden der Bundesanstalt für Geowissenschatenund Rohstoffe
GEOSS	Global Earth Observation System of Systems www.earthobservations.org/index.html. Initiative der *ad hoc intergovernmental Group on Earth Observations* (ad hoc GEO), 40 Staaten, Beginn 2005; Ziel ist eine verbesserte Kooperation bei der Erdbeobachtung (Datengewinnung, Datenaufarbeitung, Datenaustausch, Qualitätskontrolle, Verfügbarkeit, Benutzeranforderungen)
GDI-DE	Geodateninfrastruktur Deutschland. Nationale Basis für den Zugriff auf dezentral verteilte Geodaten und Geodienste Deutschlands; s.a. Architekturkonzept GDI-DE: Regeln, interoperable Daten im Rahmen eines technisch offenen Konzepts bereitzustellen (ISO- und OGC-basiert).
GeoZG	Geodatenzugangsgesetz
GMES	Globale Überwachung von Umwelt und Sicherheit http://ec.europa.eu/research/leaflets/gmes/page_42_de.html
InGrid®	Software zum Aufbau des Portal U (derzeit InGrid version 1.0). - Werkzeug zur Unterstützung der Behörden bei der Umsetzung der EU-Umweltinformationsrichtlinie - InGrid® unterstützt den OGC-Standard CSW 2.0 für geografische Metadaten - Darstellung und Kombination OGC-konformer Kartendienste - InGrid®Editor als leistungsfähige, ISO 19115/19119- und INSPIRE-konforme Metadatenerfassungs- und –pflegekomponente
INSPIRE	Infrastruktur für raumbezogene Informationen in Europa http://inspire.jrc.ec.europa.eu/ : „*Richtlinie 2007/2/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 14. März 2007 zur Schaffung einer Geodateninfrastruktur in der Europäischen Gemeinschaft*“. Durchführungsbestimmungen (derzeit durch sog. *Drafting Teams* erarbeitet) regeln die technische Umsetzung.
Interoperabilität	Interoperabilität ist die Fähigkeit unabhängiger, heterogener Systeme, möglichst nahtlos zusammenzuarbeiten, um Informationen auf effiziente und verwertbare Art und Weise auszutauschen bzw. dem Benutzer zur Verfügung zu stellen, ohne dass dazu gesonderte Absprachen zwischen den Systemen notwendig sind. (http://de.wikipedia.org/wiki/Interoperabilität). *Semantische Interoperabilität* ist dann gegeben, wenn unterschiedliche Metadatenformate ein gemeinsames Vokabular verwenden. *Strukturelle Interoperabilität* ist dann gegeben, wenn unterschiedliche (Meta-)Datenformaten ein gemeinsames Datenmodell zugrunde liegt. *Syntaktische Interoperabilität* ist die Fähigkeit von funktionalen Einheiten (typischerweise Softwarekomponenten), Informationen und Funktionen ohne Zwischenverarbeitungsschritte auszutauschen (gemeinsame Kodierungssyntax, z. B. über XML).
ISO	International Organization for Standardization (Internationale Organisation für Normung)
JRC	European Commission Joint Research Centre (Gemeinsame Forschungsstelle)
Katalog	hier: Sammlung von Metadaten eines Anbieters
Katalogdienst	„In Katalogdiensten werden Metadaten von Datenanbietern über die angebotenen Geodaten, Geodienste und Anwendungen publiziert“ (AK Architektur der GDI-DE 2007). Als Standard wird in der Regel der → Catalogue Service Web (CSW) verwendet.
Metadaten	Metadaten sind „Daten über Daten“. Sie geben Auskunft, „wer“, „wo“ über „welche“ Daten verfügt und ermöglichen so das Auffinden von Informationen.
Portal U	Umweltportal Deutschland des Bundes und der Länder www.portalu.de; ermöglicht zentralen Zugriff auf Internetseiten, Datenkataloge und Datenbankeinträge von öffentlichen Institutionen und Organisationen im Bund und in den Ländern.
O&M	Oberservation & Measurements, Standard des → OGC zu → SWE und → SOS

Wichtige Begriffe und Abkürzungen zum Thema Datenbereitstellung	
OGC	Open Geospatial Consortium - gemeinnützige Organisation, die sich zum Ziel gesetzt hat, die Entwicklung von raumbezogener Informationsverarbeitung (insbesondere Geodaten) auf Basis allgemeingültiger Standards zum Zweck der Interoperabilität festzulegen (http://de.wikipedia.org/wiki/Open_Geospatial_Consortium).
RTD	Research and technology development
SEIS	Shared Environmental Information System http://ec.europa.eu/environment/seis/ - Availability of real-time environmental data at all levels (local to European) - Communication of the EC "Towards a Shared Environmental Information System (COM/2008/0046 final)
SISE	Single Information Space in Europe for the Environment
SOA	Service Oriented Architecture: Diensteorientierte Architekturen, bilden das informationstechnische Architekturmuster für Geo-Dateninfrastrukturen. (z.B. INSPIRE, GDI-DE, etc.), Dabei kommunizieren verteilt vorliegende Ressourcen (z.B. Daten und Funktionen) interoperabel über standardisierte Schnittstellen (Dienste).
SoilML	Global Standard for the Collation and Transfer of Soil Data and Information
SOS	Sensor Observation Service
SWE	Sensor Web Enablement
Thesaurus	Strukturierte Sammlung von Begriffen, die ein Fachgebiet abdecken (AK Architektur der GDI-DE 2007); beinhalten konsistentes Vokabular zur Metadateneingabe und Katalogrecherche.
UDK	Umweltdatenkatalog - Informationssystem zum Nachweis von Umweltinformation der öffentlichen Verwaltungen in Deutschland (30.000 Einträge Stand 2005); Verwaltungsvereinbarung vom 01.01.2003 koppelt UDK an das Umweltinformationsnetz Deutschland, ab 2006 wird beides im Portal U zusammengeführt. Die Metadatenerfassung des UDK (Windows-UDK) fließt in die Portal U-Software InGrid 1.0 ein.
UIG	Umweltinformationsgesetz
WCS	Web Coverage Service
WFS	Web Feature Service
WISE	EEA/Eionet Service http://water.europa.eu/en/welcome - gateway to information on European water issues - compiles data and information collected at EU level by various institutions and bodies - WISE viewer provides access to geographically-mapped information on water-related issues for the whole of Europe (water quality, water quantity) - information about the implementation of the EU water legislation (in particular EU Water Framework Directive)
WMS	Web Map Service
XML	eXtensible Mark up Language – Auszeichnungssprache zur Darstellung hierarchisch strukturierter Daten; u. a. für den Austausch von Daten zwischen Computersystemen, speziell über das Internet (http://de.wikipedia.org/wiki/Xml). Dabei werden Eigenschaften, Zugehörigkeiten von Wörtern/Sätzen/Abschnitten eines Textes/Datensatzes beschrieben bzw. zugeteilt; mit *Tags* markiert.

4.1 Aufgabenstellung und Vorgehensweise

Arbeitspaket C analysiert die Anforderungen potenzieller Nutzer von klimarelevanten Bodendaten sowie entsprechende Datenbeschreibungen (Metadaten, s. Begriffe). Auf dieser Grundlage wurde ein Konzeptvorschlag erarbeitet, wie der Zugang zu projektrelevanten Informationen und Daten verkürzt und vereinfacht werden kann. Zudem werden in Richtung der Bundesbehörden und deren technischen Providern Empfehlungen

ausgesprochen, wie sie die Datenlieferanten und Datennutzer effizient unterstützen können.

Neben den Bedürfnissen der Nutzer spielen die rechtlichen Grundlagen und die damit einhergehenden Verpflichtungen sowie die daraus resultierenden aktuellen bzw. zukünftigen Entwicklungen (Datenbereitstellung, INSPIRE, Nutzungseinschränkungen) eine bedeutende Rolle (s. Tab. 4.1).

Zu betrachten sind die in Kap. 3.1.1 beschrieben Kategorien von Bodendaten:

1) Punktbezogene Messdaten für den Bodenzustand, dazu gehören Standort-, Bodenprofil- und Probenahmedaten sowie chemisch-, physikalische und biologische Analyseergebnisse

2) Boden-Flächendaten (Karten zum Bodenzustand und thematische Karten)

In beiden Kategorien liegen „Geodaten“ vor, d.h. georeferenzierte Punkte (1) bzw. Linien und Flächen (2).

Im Fokus des BOKLIM-Vorhabens stehen die Messdaten aus existierenden Bodenmonitoring- und -inventurnetzen. Bodenkarten und morphologische Bodenprofilansprachen sind in diesem Kontext wichtige Hintergrundinformationen, werden jedoch im vorliegenden Bericht nicht als Schwerpunkt behandelt.

Messdaten über den Bodenzustand (aber auch andere Umweltmessdaten) sind derzeit nicht in ausreichendem Maße zugänglich. Neben Kartendaten könnten auch punktuelle Messdaten unter Nutzung von Internetportalen zukünftig zumindest teilautomatisiert bereitgestellt werden (s. a. INSPIRE). Standards gibt es zwar bereits für die Standortbeschreibung und Analytik (z. B. ISO Normen des TC 190 Soil Quality) sowie für die Bodenprofilbeschreibung und Kartierung (Kartieranleitung Ad hoc-AG Boden), aber für das Datenmanagement (Datenerfassung/-speicherung/-bereitstellung) sind entsprechende Standards noch in Entwicklung (z.B. im Kontext von ISO und INSPIRE). Die Kodierung und Strukturierung von derzeit bereitgestellten Messdaten ist daher weitestgehend projektspezifisch, so dass Daten auch nur projektspezifisch abgefragt und genutzt werden können.

Für die Bereitstellung von **Boden-Flächendaten (Karten)** via Web-GIS-Komponenten gibt es Normen (OGC-Standards, ISO-Normen), die bei der Gestaltung von Dateninfrastrukturen in der Regel berücksichtigt werden (Deutschland: GDI-DE; Europa: ESDI; Global: GEOSS. Erläuterung s. Begriffe). Probleme auf Nutzerseite verbleiben dennoch: Datenverfügbarkeit, Metadaten, Ansprechpartner, Kosten, grenzüberschreitende Harmonisierung/Interoperabilität.

Metadaten über digitale bodenkundliche Produkte liegen derzeit in geringem Umfang vor. In Berichten oder Hinweisen auf Webseiten finden sich Projektbeschreibungen und Parameterlisten. Vorschläge und Übereinkünfte, mit welchen fachlichen Metadaten entsprechende Datensätze zu beschreiben sind, werden aktuell ebenfalls in diversen Initiativen erarbeitet (z.B. GS SOIL). Liegen diese vor, lassen sich auch klare Hinweise zu den Möglichkeiten und Grenzen der Verwendung bestimmter Datensätze bzw. Datenbankauszüge finden. Projektübergreifende Auswertungen bodenkundlicher Fachdaten sind dann erst sinnvoll möglich.

Zielsetzung und Vorgehensweise

Das BOKLIM-Projekt entwickelt Lösungsmöglichkeiten, um die Informationsvernetzung zwischen Datenbesitzern und Datennutzern zu verbessern - einerseits durch eine inhaltliche Analyse des Datenbedarfs der klimarelevanten Forschung und des Datenangebots (BOKLIM Arbeitspaket B), andererseits in Verbindung mit Aktivitäten zum Aufbau von Dateninfrastrukturen in Deutschland und Europa (z.B. Entwicklung eines Umweltüberwachungssystems durch ein Netzwerk sog. verteilter Dienste[1]) (BOKLIM Arbeitspaket C). Kernbestandteil von Dateninfrastrukturen ist der automatisierte Austausch von Metadaten und Geodaten durch Web-Dienste. Diese Form des Datenaustausches ist teilweise noch Neuland für viele datenhaltende Stellen, erlaubt insbesondere für den Datennutzer eine deutlich leichtere Datenverfügbarkeit, aber auch große Effizienzgewinne bei der Datenbereitstellung. Standardisierte Methoden für den webbasierten Datenaustausch existieren bereits, sind allerdings nur teilweise in konventionellen Softwarepaketen realisiert (z.B. INSPIRE-Metadaten in ArcGIS). Ferner werden

[1] Datenhalter stellen ihre Daten selbst als Web-Dienste bereit. Durch Nutzung abgestimmter Austauschformate/Spezifikationen werden interoperable Daten ausgetauscht.

aktuelle fachspezifische Erweiterungen ausgearbeitet (z.B. INSPIRE Datenspezifikationen Boden; s.a. EU-Projekt GS Soil).

Zentrale Richtschnur der Konzeptentwicklung hin zu einer interoperablen Bereitstellung und Nutzung von klimarelevanten Bodendaten in BOKLIM stellt die **INSPIRE-Richtlinie** dar. Interoperabilität bedeutet hier verkürzt, dass die bereitgestellten Informationen und Daten einheitlich und verständlich beschrieben und kodiert sind, damit sie über Institutions- und Systemgrenzen hinweg fachlich sinnvoll und korrekt weiterverwendet und ausgewertet werden können.

Vor dem Hintergrund der Nutzerbedürfnisse und der Situation bei den Datenbesitzern werden Anforderungen und Möglichkeiten gegenübergestellt, um mehr Klarheit in künftige Entwicklungen, Strukturen und Lösungen zu bringen. Die nachfolgenden Abschnitte sind wie folgt untergliedert:

- Analyse der Datenstrukturen der relevanten **Bodendaten-Erhebungsprogramme** und Bewertung hinsichtlich einer effizienten Vernetzung mit potenziellen Nutzern aus dem Klimafolgenforschungsbereich (Nutzen-Aufwand) (Kap. 4.2),
- Analyse der **rechtlichen Grundlagen und der Anforderungen Beteiligter an die „Vernetzung“ klimarelevanter Bodendaten sowie der technischen Anforderungen**, z.B. an die erforderliche Software (Kap. 4.3),
- Darstellung der Möglichkeiten und der Anforderungen des Metadatenmanagements (**Metadatenprofil**, **Metadatenkataloge und Metadatenportale**) (Kap.4.4 4.4),
- Erläuterung der Möglichkeiten und Entwicklungstendenzen von relevanten **Dateninfrastrukturen** (Kap. 4.5),
- Entwurf eines **Zukunftsszenarios** für die Datenbereitstellung durch Dateninfrastrukturen, wie sie derzeit entwickelt werden (z.B. GDI-DE auf Bundesebene (Kap. 4.6)

Auf dieser Grundlage wurde ein **Umsetzungskonzept** entwickelt, das konkrete nächste Schritte hin zu einer effizienteren Datennutzung benennt. Handlungsempfehlungen zur Umsetzung der einzelnen Schritte sind in Kapitel 6.2 aufgeführt und den jeweils verantwortlichen Akteuren zugeordnet.

Methodisch beruhen die Ergebnisse auf Recherchen der rechtlichen Grundlagen und aktuellen Entwicklungen auf dem Gebiet der Datenbereitstellung und –vernetzung in Literatur und Online-Medien, Arbeitsgespräche mit der Koordinierungsstelle des Portal U und ausgewählten Datenbesitzern sowie aktuellen Diskussionsergebnissen in technischen Fachkreisen.

Tab. 4-1: Projekte und Aktivitäten mit Relevanz für die Entwicklung von bodenkundlichen Metadaten- und Datenspezifikationen

Initiative	Spezifikationen und Standards (normative Referenzen)
ISO	„International Organization for Standardization“: Die internationale Vereinigung von Normungsorganisationen und erarbeitet internationale Normen in allen Bereichen mit Ausnahme der Elektrik und der Elektronik. Das Technische Komitee TC 211 (Geographic Information/Geomatics) arbeitet an der Normung auf dem Gebiet der Geoinformation(ISO TC 211) erarbeitet die ISO-Norm 191xx ISO-Norm 191xx. s. noramtive Referenzen: Weitere ISO Standards aus dem Bereich Boden (ISO TC190) sind von Belang. (s. normative Referenzen Kapitel 4.3.3 und Kapitel 4.3.4) Weitere Informationen: http://www.iso.org , www.isotc211.org
OGC	Das „Open Geospatial Consortium“ (OGC) ist eine 1994 gegründete gemeinnützige Organisation, die sich zum Ziel gesetzt hat, die Entwicklung von raumbezogener Informationsverarbeitung (insbesondere Geodaten) auf Basis allgemeingültiger Standards zum Zweck der Interoperabilität festzulegen. Das OGC entwickelt maßgebliche weltweit gültige Standards für das Geodatenmanagement. Die relevanten Standards zu Such-, Darstellungs-, Download- und Sensordiensten sind Kapitel 4.3.4 zu entnehmen.
INSPIRE-Durchführungs-bestimmungen	Die „Infrastructure for Spatial Information in the European Community“ (INSPIRE) ist eine Initiative der europäischen Kommission mit dem Ziel, eine europäische Geodaten-Basis mit integrierten raumbezogenen Informationsdiensten zu schaffen. Die Richtlinie 2007/2/EG vom 14. März 2007 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 14. März 2007 zur Schaffung einer Geodateninfrastruktur in der Europäischen Gemeinschaft (INSPIRE), in Kraft seit dem 15. Mai 2007, verpflichtet die Mitgliedstaaten, stufenweise interoperable Geobasisdaten sowie Geofachdaten (z.B. auch Bodendaten) bereitzustellen. Relevante Produkte und Spezifikationen sind in Kap. 4.3.1 zu entnehmen. Weitere Informationen, s. http://inspire.jrc.ec.europa.eu.
JRC-Projekt (Tender)	Development and prototyping of INSPIRE technical specifications for air, water, waste and biodiversity Environmental Monitoring Facilities (EMF)
Geodaten-Infrastruktur Deutschland (GDI-DE)	Im Rahmen der Geodateninfrastruktur Deutschland (GDI-DE) werden Infrastrukturen zur nationalen Umsetzung der INSPIRE-Richtlinie entwickelt. Die GDI-DE verfügt damit über relevante Komponenten, die für BOKLIM potenziell zum Einsatz kommen können. Architektur der Geodateninfrastruktur Deutschland Version 2.0 (2010) Weitere Informationen: http://www.gdi-de.org
Portal U	Das Umweltportal Portal U stellt Metainformationen und Kartendienste zu Umweltinformationen interoperable und INSPIRE-konform zur Verfügung. Portal U verfügt damit ebenfalls über relevante Komponenten, die für BOKLIM potenziell zum Einsatz kommen können. Beispielkomponenten sind InGrid als Software zur Verwaltung und Bereitstellung von Metadatenkatalogen (Nachfolgesystem der bisherigen Umweltdatenkatalog-Software UDK-Software) Weitere Informationen: http://portalu.de
GS Soil EU Projekt	„Assessment and strategic development of INSPIRE compliant Geodata-Services for European Soil Data“ (GS SOIL) ist ein EU-Projekt (e-contentPlus Programm), das von Juni 2009 bis Mai 2012 läuft. Ziel: INSPIRE-kompatible Bereitstellung von Bodendaten mit Raumbezug sowie Entwicklung eines europäischen Bodeninformationsportals in Anlehnung an das PortalU Behandelt werden die Entwicklung interoperabler bodenkundlicher Karten- wie auch Messdaten für die Weitergabe als Webdienste, sowie die Entwicklung von Metadaten. Dabei werden Harmonisierungsmethoden wie auch Datenaustauschstrukturen für INSPIRE weiterentwickelt und getestet (ISO 28258 Austausch von Bodendaten). Das Projekt wird von der Koordinierungsstelle des Portal U (Nieders. Umweltministerium Hannover) koordiniert. Weitere Informationen: http://www.gssoil.eu
eEarth EU Projekt (TCHISTIAKOV et al. 2005)	„Electronic Access to the Earth through Boreholes“ (2004-2006) zentrales Web-Portal mit Links zu den nationalen Bohrungsdatenbanken (Partner eEarth) sowie GIS-Funktion zur Recherche von Bohrungen "On-the-fly" Übersetzungsmöglichkeiten für standardisierte, geowiss. Begriffe Weitere Informationen http://www.eearth.eu/

4.2 Bereitstellung von Daten für die Klimafolgenforschung und -anpassung

In Kapitel 3 wurden die wesentlichen Programme des Bodenmonitoring und der Bodenzustandserhebung beschrieben und aus bodenkundlicher Sicht auf ihre Eignung für Fragestellungen im Kontext Klimawandel bewertet. Um Datenaustauschmechanismen für die einzelnen Programme vorschlagen zu können, bedarf es zusätzlich einer technischen Betrachtung der Programme und der daraus entstehenden Datenbestände. Die Analyse konzentriert sich weiterhin auf überregionale oder gar bundesweit betriebene Programme.

Messdaten aus bundesweit betriebenen Programmen

Eine Übersicht über den IST-Zustand der Datenbereitstellung bietet Tabelle 4.2. Gemäß Aufgabenstellung des Gesamtprojekts konzentriert sich das Projekt auf Daten, die für bundeslandübergreifende Fragestellungen wichtig sind.

Die Datensätze aus Programmen des Bodenmonitoring und der Bodenzustandserhebung sowie weitere langfristige Boden-Beobachtungsaktivitäten wurden im Hinblick auf die Bedingungen für eine effiziente Datenbereitstellung analysiert und priorisiert. Tabelle 4.3 stellt technische und organisatorische Aspekte der Datenhaltung (Zentralität, Homogenität) der fachlichen Eignung im Sinne der auf den Klimawandel ausgerichteten Bodenforschung gegenüber. Für detaillierte Informationen zu den einzelnen Programmen und Boden-Flächendaten wird auf Kapitel 3.1.1 und den Entwurf der Broschüre „Mess- und Erhebungsaktivitäten für Böden in Deutschland“ (ahu AG 2009) verwiesen.

Tab. 4.2: Übersicht der Datenbereitstellung

Programm / Datensammlung	Datenbesitzer (i.d.R. Datenerheber)	Koordination in Deutschland	Datenhalter (Ansprechpartner für Datenanfragen)	Bundes-ressort
ICP Forest Level I + II	Forstliche Verwaltungs-einrichtungen der Länder (Versuchsanstalten, Forstplanungsämter)	vTI Hamburg, vTI Eberswalde, begleitet von Bund-/Länder-Arbeitsgruppen	vTI (länderübergrei-fend) und Datenbe-sitzer	BMELV
BZE Wald	Forstliche Verwaltungs-einrichtungen der Länder (Versuchsanstalten, Forstplanungsämter)	vTI Eberswalde, be-gleitet von Bund-/Länder-Arbeitsgruppen	vTI (länderübergrei-fend) und Datenbe-sitzer	BMELV
BZE Land-wirtschaft	vTI Braunschweig	vTI Braunschweig	Daten liegen noch nicht vor	BMELV
BDF	Verwaltungseinrichtungen der Länder (Umwelt, Landwirtschaft, Forst, Geologie)	UBA, zeitweise be-gleitet von Bund-/Länder-Arbeitsgruppe	UBA (länderüber-greifend Basis-BDF) und Datenbesitzer (Basis- und Intensiv-BDF)	BMU
Landwirtschaftli-che Dauerfeldver-suche	Landwirtschaftliche Ver-waltungsbehörden der Länder (Versuchsanstal-ten), Universitäten	derzeit keine (ange-strebt)	Datenbesitzer	BMBF/ BMELV
Feldlysimeter	Forschungseinrichtungen, Private, Verwaltungsbe-hörden der Länder, Uni-versitäten	keine bekannt	Datenbesitzer	BMBF
Agrarmeteorologi-sche Daten des Deutschen Wet-terdienstes (DWD)	DWD	DWD	Datenbesitzer	BMVBS
Umweltproben-bank des Bundes (Probenart Boden)	UBA	UBA	Datenbesitzer	BMU
Forschungsgetrie-bene Erhebungen (z.B. CarboEuro-pe, TERENO)	Forschungseinrichtungen, Universitäten	Projektübergrefend keine bekannt	Datenbesitzer	BMBF
Boden-Flächendaten	BGR, Verwaltungsbehör-den der Länder, Geologi-sche Dienste	BGR, begleitet von Bund-/Länder-Arbeitsgruppen	Datenbesitzer	BMWi

Tab. 4.3: Eignung und Homogenität ausgewählter Datenbestände in Deutschland

	Fachliche Eignung*	Technisch-organisatorische Eignung**	Datenhomogenität	Datenhaltung
ICP Forest Level II	hoch	hoch	hoch	zentral und dezentral
Agrarmeteorologische Daten DWD	hoch	hoch	hoch	zentral
Intensiv-BDF	hoch	mittel	gering	dezentral
Basis-BDF	mittel	hoch	z.T. hoch (UBA-bBIS)	zentral und dezentral
ICP Forest Level I / BZE Wald	mittel	hoch	hoch	zentral und dezentral
BZE Landwirtschaft	mittel	gering (Daten liegen noch nicht vor)	hoch (zu erwarten)	zentral
Feldlysimeter	hoch	gering	gering	dezentral
Landwirtschaftliche Dauerfeldversuche	hoch	gering	sehr gering	dezentral
Umweltprobenbank	gering	hoch	Hoch	zentral

* für Fragestellungen von Klimasystemforschung, Klimafolgen- und -anpassungsforschung
** nach derzeitigem Stand der Datenhaltung und -bereitstellung

Die aufgelisteten Datenbestände werden sehr unterschiedlich verwaltet. Wichtig ist darüber hinaus:

- Es gibt keine zentrale Auskunftsinstanz zur Recherche der vorhandenen Daten.
- In der Regel liefern die Datensammlungen keine Übersichten über die verfügbaren Messdaten.
- Metadaten sind kaum verfügbar und wenn, dann nicht formalisiert vergleichbar.
- Vergleichbare Inhalte sind sehr unterschiedlich kodiert (z. B. Profilbeschreibungen, Humusgehalte).
- Messstandorte liegen in unterschiedlichen geographischen Referenzsystemen vor.

Als Konsequenz ist der Weg vom Datenbedarf zu tatsächlich verfügbaren Daten derzeit sehr umständlich.

Dennoch bestehen zu einzelnen Programmen bereits Datensammlungen, Auskunftssysteme und Datenschnittstellen. Diese können für die wichtigsten Programme beispielhaft folgendermaßen beschrieben werden:

- ICP Forest Level II: einheitliche Datenhaltung und Auskunftssystem (Stammdaten wie z.B. Lagekoordinaten, Bodentyp und Metadaten wie z.B. untersuchte Parameter) für die Standorte und die dort verfügbaren Daten[2]; Monitoring-Datenbank für das Datenmanagement im EU-Projekt FutMon mit geplanter Funktion zur Datenweitergabe, siehe HOSENFELD et al. (2010).
- Basis-BDF: bundesweite Schnittstelle bBIS, die eine Zusammenführung der Daten beim UBA ermöglicht. Da die Datenhaltung in den Bundesländern jedoch sehr heterogen ist und keine Vereinbarungen zum Austauschzyklus bestehen, wird die Schnittstelle bisher noch nicht vollständig bzw. regelmäßig bedient.
- Intensiv-BDF: Datenhaltung in den Ländern; bisher keine einheitlichen Strukturen.
- BZE Wald: zentrale Datenbank des vTI Eberswalde (Schnittstellen nicht bekannt).
- BZE Landwirtschaft: noch nicht verfügbar (derzeit Datenerhebung); zentrale Datenhaltung ist vorgesehen.

Aus der Zusammenschau lässt sich ableiten, dass die Daten aus ICP Forest Level II und die Agrarmeteorologischen Daten des DWD die besten Voraussetzungen für eine vergleichsweise einfache Vernetzung aufweisen. Deutlich ungünstiger sind die Verhältnisse für die BDF-Daten und sowie auch für die landwirtschaftlichen Flächen, solange die Daten der landwirtschaftlichen Dauerfeldversuche dezentral und die BZE Landwirtschaft noch nicht vorliegt.

Messdaten aus regional betriebenen Programmen

Neben den bundesweiten Bodenzustandserhebungen und Monitoringprogrammen existieren eine Vielzahl regional begrenzter Datensätze sowie Messnetze ohne (zumindest bisher geplante) Wiederholungsaufnahmen (siehe Kap. 3). Diese werden zunächst nicht betrachtet, da auch sie aufgrund ihrer teilweise hohen räumlichen Auflösung vornehmlich regional von Bedeutung sind, und für bundesweite Auswertungen

---

[2] siehe http://www.fao.org/gtos/tems/tsite_list.jsp?VIEW_BY=1&COUNTRY_ID=276&NETWORK_ID=211&search.x=36&search.y=12&VARTYPES=-1

ohne vorbereitende Auswertungen und Harmonisierungen nicht zur Verfügung stehen. Sie könnten jedoch zu einem späteren Zeitpunkt sukzessive in eine Dateninfrastruktur integriert werden, wenn klare Vorgaben für die Datenbereitstellung vorliegen.

Räumliche Daten (Bodenkarten und thematische Karten)

Von den georeferenzierten punktuellen Messdaten mit zeitlicher Komponente sind die Flächendatenbanken der Bundesländer zu unterscheiden, die im Zuge der bodenkundlichen Landesaufnahmen entstanden sind. Flächendatenbanken umfassen Bodenprofile (Schätz- oder Messprofile) sowie Legenden und Geometrien. Diese Kartengrundlagen stehen derzeit bei der deutschland- und europaweiten interoperablen Datenbereitstellung im Kontext von INSPIRE primär im Vordergrund (s.a. GS SOIL). Sie enthalten zwar detaillierte Systematiken und Klassifikationen (z.B. landesspezifische Bodentypen), sind aber von ihrer inneren Objektstruktur vergleichsweise einfach strukturiert. Für die Klimaforschung bilden Sie eine wichtige Grundlage zur Regionalisierung von punktuell vorliegenden Messwerten und Kenngrößen, aber auch zur Abschätzung von Datenlücken. Die relevanten Bodenkarten sind in Kapitel 3.1.1 sowie detailliert im Bericht „Mess- und Erhebungsaktivitäten für Böden in Deutschland - Bodendaten für Fragen zu Klimawandel, Klimafolgen und Anpassung“ (Entwurf UBA 2009) beschrieben.

4.3 Anforderungen an eine effiziente Datenbereitstellung

Im Rahmen der Anforderungserhebung für die Optimierung der Informationsvernetzung von klimarelevanten Bodendaten werden rechtliche, fachlich motivierte und technisch motivierte Anforderungen gesammelt. Durch die Analyse der Anforderungen sollen die Grundlagen für ein gemeinsames Verständnis der Beteiligten geschaffen werden.

Vor der Ausweisung technischer Anforderungen werden die rechtlichen Anforderungen, die Interessen der maßgeblichen Akteure rund um die Vernetzung von klimarelevanten Bodendaten sowie die fachlichen Anforderungen an die Metadaten und bereitgestellten Daten festgestellt.

4.3.1 Rechtliche Anforderungen und Normen

Rechtliche Rahmenbedingen sind durch die INSPIRE-Richtlinie samt der Umsetzung in den Geodatenzugangsgesetzen des Bundes (Geodatenzugangsgesetz GeoZG vom

10. Februar 2009, BGBl. I S. 278) und der Länder sowie die Umweltinformationsgesetze (Bund und Länder) gegeben.

Die Richtlinie zur Schaffung einer Geodateninfrastruktur in der Europäischen Gemeinschaft (INSPIRE-Richtlinie; 2007/2/EG; 14. März 2007) schafft die Voraussetzungen für den Aufbau einer europäischen Geodateninfrastruktur, die auch georeferenzierte Boden- und Klimadaten umfassen.

Ziel der INSPIRE-Richtlinie ist es, qualitativ hochwertige Geodaten aus den Behörden der Mitgliedstaaten unter einheitlichen Bedingungen zur Unterstützung der Formulierung, Umsetzung und Bewertung europäischer und nationaler Politikfelder zugänglich zu machen. Das Produkt ist eine Europäische Geodateninfrastruktur (ESDI).

Damit wird für ganz Europa ein Rahmen geschaffen, welche Daten allgemein verfügbar gemacht werden müssen, sondern auch in welcher Form und Aufschlüsselung. Zudem wird auch die informationstechnische Bereitstellung spezifiziert.

Die Umsetzung in nationales Recht in Deutschland erfolgte mit dem Gesetz über den Zugang zu digitalen Geodaten (Geodatenzugangsgesetz – GeoZG) vom 14. Februar 2009 auf Bundesebene. Entsprechende Ländergesetze sind gefolgt (z.B. Gesetz über den Zugang zu digitalen Geodaten Nordrhein-Westfalen (Geodatenzugangsgesetz - GeoZG NRW) vom 17. Februar 2009, Thüringer Geodateninfrastrukturgesetz (ThürG-DIG) vom 08.07.2009 (Stand s. www.gdi-de.org).

Bisher wird eine Datenübermittlung zwischen Bund und Ländern zur Erfüllung von Bodenschutzaufgaben auf der Grundlage einer Verwaltungsvereinbarung zwischen Bund und Ländern über den Datenaustausch im Umweltbereich (VwV Datenaustausch 1994; Anhang Boden 1998) geregelt. Über den Vollzug des BBodSchG hinaus dient die Datenübermittlung auch Aufgaben aus dem Bereich Umweltdokumentation und Umweltberichterstattung, wie z.B. die bundesweite Darstellung des Bodenzustandes, die Schaffung der Grundlagen für Trendaussagen, der Erfolgskontrolle von Maßnahmen im Umweltschutz und der Harmonisierung der Datenerhebung zur länderübergreifenden Vergleichbarkeit und der Erstellung von Berichten und Mitteilungen des Bundes an internationale Organisationen (z.B. EU, EUA, OECD). Die VwV Datenaustausch enthält Regelungen für Geowissenschaftliche Grunddaten (Bodenübersichtskarte 1:200.000 (BÜK 200) (zuständig: BGR) und für Daten von Bodendauerbeobachtungsflächen (zu-

ständig: UBA). Für letztere Daten ist vereinbart, dass die Übergabe einmal jährlich je Bodendauerbeobachtungsfläche erfolgt. Die wesentlichen für die Auswertungen des Bundes erforderlichen Daten umfassen gemäß VwV Anhang 4, Teil 4 Parameter zur Standortbeschreibung, zum Bodenzustand und zu Ein- und Austrägen von Stoffen.

Einige Eckpunkte von INSPIRE sind:

- Aktuell entsteht in den Drafting Teams und Thematic Working Groups (TWG) eine fachlich-inhaltliche und technische Konkretisierung der Richtlinie mittels Durchführungsbestimmungen; auch diese werden anschließend von den Mitgliedstaaten in nationales Recht umgesetzt.
- In Deutschland ist das BMI für die Umsetzung der INSPIRE-Richtlinie verantwortlich. Das BMU und dessen nachgeordnete Institutionen beim Bund und in den Ländern sowie auf kommunaler Ebene liefern die entsprechenden Umweltdaten.
- INSPIRE fordert webbasierte Online-Dienste für die Suche, die Visualisierung und den Download der Daten. Daten müssen gemäß INSPIRE-Datenspezifikationen interoperabel sein.

<u>INSPIRE thematisiert Bodendaten in folgenden Aspekten:</u>

Boden wird als Geodaten-Thema in Annex III der INSPIRE-Richtlinie 2007/2/EG definiert. Boden umfasst demnach „die Beschreibung von Boden und Unterboden anhand von Tiefe, Textur, Struktur und Gehalt an Teilchen sowie organischem Material, Steinigkeit, Erosion, gegebenenfalls durchschnittliches Gefälle und erwartete Wasserspeicherkapazität“ (siehe auch INSPIRE Drafting Team ‚Data Specifications’ 2007). Damit ist zwar ein Rahmen vorgegeben, es ist jedoch nicht aufgelistet, welche Daten betroffen sind (z.B. Parameter, räumliche und zeitliche Auflösung). Diese Festlegungen werden aktuell im Rahmen der Entwicklung der Datenspezifikationen (für die Erzeugung und den Austausch interoperabler Bodendaten) durch die Thematic Working Group Soil (TWG-SO) getroffen.

Im Bericht 2.3 des Drafting Teams Data Specifications wird Bezug genommen auf Messnetze und Monitoringergebnisse, Bodenkarten sowie thematische Karten zum Bodenschutz und -zustand. Unklar ist noch, inwieweit bodenkundliche Messdaten aus Monitoringnetzen unter dem Annex III Thema ‚Environmental Monitoring Facilities’ be-

handelt werden, oder unter dem Thema ‘Boden’. Dies wird aktuell zwischen den einzelnen thematischen Arbeitsgruppen erörtert. Wichtiger als diese eher strukturelle Frage ist die naheliegende Erkenntnis, dass auch auf die für die Klimafolgenfolgenforschung und –anpassung benötigten Bodendaten die INSPIRE Durchführungsregeln zutreffen.

Für bereits existierende Geodaten sind im Falle des Themas Boden (INSPIRE Annex III) bis 15.05.2013 die Metadaten und spätestens 2019 die Geodaten selbst über Web-Dienste bereitzustellen. Neue Datensätze müssen bereits Mitte 2014 INSPIRE-konform bereitgestellt werden (s. Abb. 4.1).

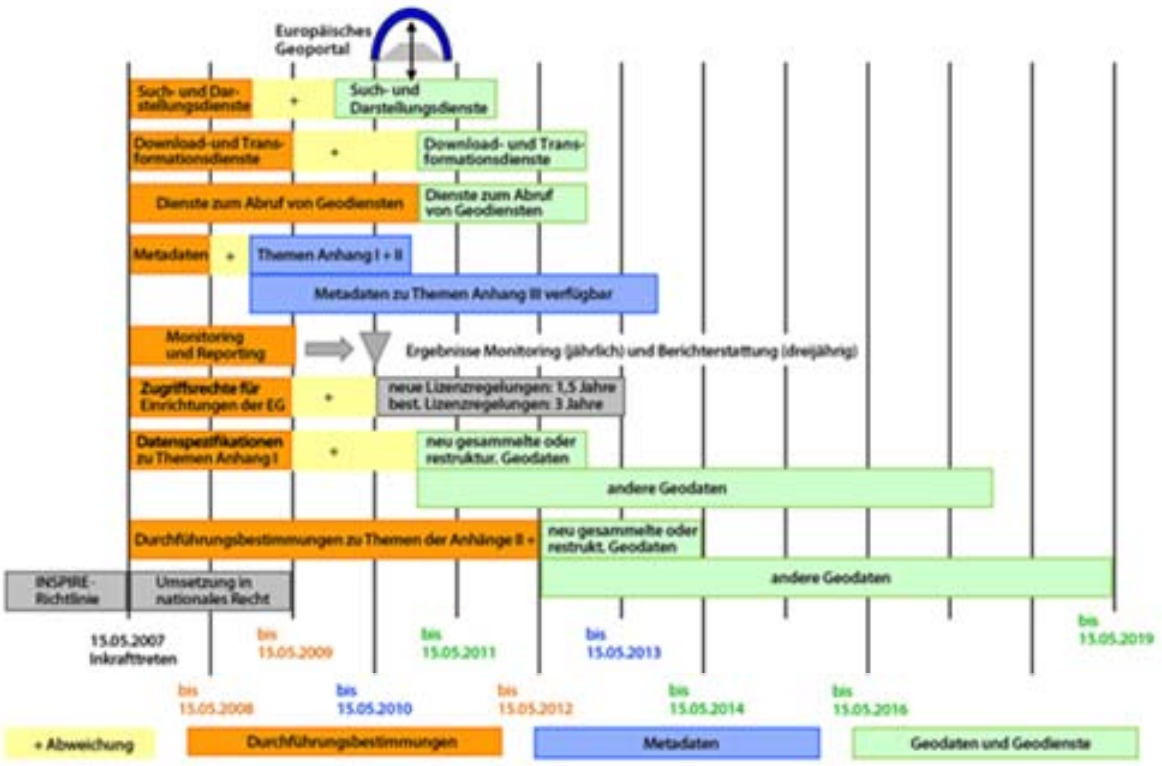


Abb. 4.1: INSPIRE-Zeitplan Quelle: http://www.gdi-de.org/inspire/zeitplan, zuletzt abgerufen 22.02.2011)

Neben INSPIRE und den davon abgeleiteten Gesetzen und Regelungen spielt auch das Umweltinformationsgesetz (UIG) eine Rolle im vorliegenden Kontext. Es hat das Ziel, den freien Zugang zu Umweltinformationen zu schaffen und Umweltinformationen zu verbreiten. Es gilt unmittelbar für informationspflichtige Stellen des Bundes. Die Umweltinformationsgesetze der Länder gelten für informationspflichtige Stellen der jeweiligen Bundesländer und verweisen entweder auf das UIG oder regeln eigenständig den gleichen Sachverhalt (online-Resource: http://de.wikipedia.org/wiki/ Umweltinformationsgesetz, zuletzt abgerufen am 22.02.2011).

Die derzeitigen rechtlichen Anforderungen legen somit Grundsätze einer Bereitstellung von Bodendaten fest, die konkrete Ausgestaltung (z.B. welche Parameter, welche Formate etc.) ist jedoch derzeit noch in Arbeit.

Relevante Normen und Vorgaben aus dem INSPIRE-Kontext sind am Ende des Kapitels aufgelistet (weitere Technische normative Referenzen s. Kapitel 4.3.3 und Kapitel 4.3.4.).

Aktuelle Regelungen zum Datenaustausch

Zwischen Bund- und Ländern bestehen in unterschiedlichen Kontexten bereits Regelungen zum Datenaustausch.

- In diversen ad hoc Arbeitsgruppen des Bund/Länder-Ausschusses Bodenforschung (BLA-GEO) werden Regelungen zum bilateralen Datenaustausch getroffen, um Geodaten und Karten projektbezogen auszutauschen (z.B: BÜK 200).
- Für den Austausch von BZE II Daten liegt im Rahmen der Bund-Länder Arbeitsgemeinschaft BZE ein Beschluss vom 29./30.06.2004 vor, der den digitalen Austausch von Primärdaten in einem vorgegebenen Format zwischen den Ländern und dem Bund regelt. Der Beschluss stellt klar, dass die Daten vor der Weitergabe qualitätsgesichert werden und nicht frei zugänglich sind.
- Für die Erfüllung von Bodenschutzaufgaben haben die Umweltverwaltungen des Bundes und der Länder eine Verwaltungsvereinbarung über den Datenaustausch im Umweltbereich entwickelt (VwV Datenaustausch 1994; Anhang Boden 1998). Über den Vollzug des BBodSchG hinaus dient die Datenübermittlung auch Aufgaben aus dem Bereich Umweltdokumentation und Umweltberichterstattung, wie

z.B. die bundesweite Darstellung des Bodenzustandes, die Schaffung der Grundlagen für Trendaussagen, der Erfolgskontrolle von Maßnahmen im Umweltschutz und der Harmonisierung der Datenerhebung zur länderübergreifenden Vergleichbarkeit und der Erstellung von Berichten und Mitteilungen des Bundes an internationale Organisationen (z.B. EU, EUA, OECD). Die VwV Datenaustausch enthält Regelungen für Geowissenschaftliche Grunddaten (Bodenübersichtskarte 1:200.000 (BÜK 200) (zuständig: BGR) und für Daten von Bodendauerbeobachtungsflächen (zuständig: UBA). Für letztere Daten ist vereinbart, dass die Übergabe einmal jährlich je Bodendauerbeobachtungsfläche erfolgt. Die wesentlichen für die Auswertungen des Bundes erforderlichen Daten umfassen gemäß VwV Anhang 4, Teil 4 Parameter zur Standortbeschreibung, zum Bodenzustand und zu Ein- und Austrägen von Stoffen.

Relevante INSPIRE Produkte und normative Referenzen

INSPIRE Glossary

INSPIRE DS-D2.3, Definition of Annex Themes and Scope, v3.0,

INSPIRE DS-D2.5, Generic Conceptual Model, v3.1,

INSPIRE DS-D2.6, Methodology for the development of data specifications, v3.0,

INSPIRE DS-D2.7, Guidelines for the encoding of spatial data, v3.0,

INSPIRE Data Specifications on diverse technical und domain-specific Data Sets and Services

INSPIRE Draft Technical Reports of the INSPIRE Data Specifications Drafting Team

INSPIRE TWG-SO: Data Specification on Soil Draft Guidelines (in work)

INSPIRE DS-D2.8.I.8, INSPIRE Data Specifications on Hydrography –Guidelines, v3.0

INSPIRE Metadata Implementing Rules: Technical Guidelines based on EN ISO 19115 and EN ISO 19119, v. 1.1

4.3.2 Anforderungen der Akteure

Im Kontext der Vernetzung klimarelevanter Bodendaten werden folgende maßgebliche Akteure / Rollen berücksichtigt:

- Die Datenbesitzer verfügen über die Datenbestände, die im Zusammenhang mit der auf den Klimawandel ausgerichteten Bodenforschung von Interesse sind. Die maßgeblichen Datenbesitzer sind in Tabelle 4.2 genannt.

- Datenprovider sind diejenigen Institutionen, die Daten zur Verfügung stellen. In der Regel tun das die Datenbesitzer selbst (z.B. Verwaltungseinrichtungen der Länder, Universitäten, DWD, BGR). Hinzu kommen Stellen, die dezentral erhobene Daten zusammenführen und vorhalten (z.B. vTI für bundesweite Datenbestände aus ICP Forest und BZE Wald oder UBA für Basis-BDF).
- Die technischen Service-/Portal-Dienstleister (z.B. Koordinierungsstellen von Portal U und GDI-DE) stellen technische Komponenten für Dateninfrastrukturen bereit.
- Datennutzer möchten klimarelevante Bodendaten für Klimamodelle, Klimafolgenforschung, Planungsfragen oder Berichterstattung nutzen. Sie wissen in der Regel, was sie brauchen, können entsprechende Datenquellen oder gar Daten jedoch nicht mit vertretbarem Aufwand finden, weil sie diese nicht an zentraler Stelle recherchieren können.
- Unter den zuständigen Bundesbehörden werden zunächst die Bundesbehörden verstanden, die für die Erhebung und/oder Koordinierung der Erhebung von Bodendaten zuständig sind. Dies sind UBA, BGR, vTI und DWD.

In Tabelle 4.4 sind die wichtigsten Anforderungen an eine effiziente Datenbereitstellung zusammengestellt.

Aus Tabelle 4.4 lassen sich übergreifende Anforderungen seitens der Akteure ableiten:

- Das Zielsystem zum effizienten Datenaustausch, muss die erforderlichen Informationen einfach und fachgerecht bereitstellen. Bestehen bereits entsprechende Infrastrukturen, so sind diese zu nutzen.
- Die bereitgestellten Informationen müssen vergleichbar sein und die benötigten Angaben für die Nutzer enthalten.
- Der Aufwand für die Datenbereitstellung muss sich im Bereich des Machbaren bewegen und

dem Aufwand, den die Datenbesitzer und Datenprovider betreiben müssen, muss auch ein Nutzen gegenüberstehen.

Tab. 4.4: Anforderungen an eine effiziente Datenbereitstellung

Nr.	Anforderung	Forderer / Profiteur	Erbringer	Resultierende Frage
1	Bereitstellung von Metainformationen für klimawandelrelevante Messdaten aus Bodenmonitoring und Bodenzustandserhebung mit einem verbesserten Informationsgehalt der bereitgestellten Informationen (Verständlichkeit/Vollständigkeit)	Datennutzer	Datenbesitzer, Datenprovider	Welche Metadaten?
2	Das Konzept zur Metadatenerfassung muss den technischen Anforderungen / Standards und den gesetzliche Bestimmungen genügen.	Datenprovider, zuständige Behörden	Datenprovider, zuständige Behörden	
3	effiziente Vernetzung der Metainformationen	Datennutzer	Datenprovider	Welche Mechanismen?
4	Erhöhter Zugriffskomfort (Geschwindigkeit/Aufwand)	Datennutzer	Datenprovider	
5	Konzept muss mit realistischem Aufwand umsetzbar sein (Machbarkeit)	Datenbesitzer, Datenprovider	Datenbesitzer, Datenprovider	
6	Die nutzungsrechtlichen/organisatorischen Restriktionen müssen berücksichtigt werden?	Datenprovider	Datenprovider	
7	Dem Aufwand muss ein Nutzen/Mehrwert für die eigene Arbeit gegenüberstehen	Datenbesitzer	Datenbesitzer	
8	Die gesetzlichen Durchführungsbestimmungen und relevanten Standards sind zu berücksichtigen	Zuständige Behörden Bundesebene	Datenbesitzer, Datenprovider	
9	Bestehende technische Strukturen/Projekte (z.B. Portal U) sind zu bevorzugen	Zuständige Behörden Bundesebene		

Für die weitergehende Analyse stellt sich daher die zentrale Frage, inwiefern Recherchemöglichkeiten bereits bestehender oder in (Weiter-) Entwicklung befindlicher Systeme die inhaltlichen Anforderungen der Benutzer erfüllen können bzw. wann diese erfüllt sein werden. Die Diskussion dieser Frage erfolgt im Kontext der Darstellung der bestehenden Infrastrukturen in Kapitel 4.4 und 4.5.

4.3.3 Anforderungen an Metadaten und Daten

Anforderungen an Metadaten

Daten müssen so bereitgestellt werden, dass sie inhaltlich verstanden, korrekt angewendet und interpretiert werden können. Erste Voraussetzung ist, dass Datensammlungen mit entsprechenden Metadaten beschrieben werden, damit deren Inhalt, Nutzungsvoraussetzungen etc. klar sind. Diverse ISO Standards legen fest, welche allgemeinen Metadaten es gibt, wie sie technisch aufbereitet sein müssen und wie sie fachlich konkretisiert bzw. bereitgestellt werden können (Metadatenstandards ISO 19115, 19119, 19139).

Im Bereich der Bodenmessdaten treten hierbei einige fachliche Besonderheiten auf, die eine eingehende Betrachtung erfordern. Dies betrifft vorrangig die Anforderung, einer Datensammlung auch die erhobenen Bodenparameter hinreichend genau beschreiben zu können. Da diese Frage in der aktuellen Umsetzung von zentraler Bedeutung ist, wird sie in Kapitel 4.4 eingehend behandelt. Dabei werden auch die Entwicklungen in vergleichbaren Projekten berücksichtigt.

Anforderungen an die (Mess-) Daten

Ähnliche Herausforderungen wie an die Metadaten bestehen auch für die (Mess-) Daten selbst, denn auch die Dateninhalte müssen verständlich und vergleichbar, sowie leicht verfügbar sein. Entsprechende Festlegungen über die Kodierung und Struktur von Bodendaten erfolgen in Austauschformaten, Datenspezifikationen, Fachschemata oder in - sofern es sich um die Struktur von Daten in Diensten handelt – Applikationsschemata. Solche Schemata sind die Voraussetzungen für Interoperabilität, d.h. lokale wie auch web-basierte Anwendungen können Fremddaten problemlos interpretieren. Beispielsweise können im FISBo BGR interaktiv für gemäß KA5 abgestimmt kodierte Bodenprofildaten Kennwerte berechnet werden, die nur schwer analysierbar sind, und

für die auf Bundesebene abgestimmte Methoden existieren (z.B. nutzbare Feldkapazität für Bodenhorizonte).
Maßgebliche aktuelle Arbeiten für den internationalen Datenaustausch finden derzeit im Rahmen von INSPIRE und ISO statt. Die Zusammenführung beider Aktivitäten und Konkretisierung für Boden leistet aktuell das EU Projekt GS Soil. Die Aktivitäten der unterschiedlichen Initiativen sind miteinander vernetzt. Nachfolgend werden einige Hintergrund-Informationen dargestellt.

Für die Bodenmessdaten sind die Ergebnisse des ISO 28258 sowie der INSPIRE Thematic Working Group Soil (TWG-SO) von Bedeutung. Zu den Arbeiten der TW-SO lässt sich feststellen, dass ein erster Entwurf vorliegt, der jedoch als noch nicht stabil eingestuft werden muss. Erst nach Vorliegen der Version 2 der INSPIRE-Datenspezifikationen Boden (ca. Juni 2011) kann abgesehen werden, ob die unter dem Thema Boden behandelten Monitoringdaten umfassend dargestellt werden, oder ob ergänzende Anforderungen aus dem Thema Umweltbeobachtungssysteme (Environmental Monitoring Facilities) kommen. Parallel wird an der ISO / AWI 28258 gearbeitet. Die ISO Arbeitsgruppe wird bei der Erarbeitung des Austauschformates vom Projekt GS SOIL unterstützt. Die Arbeiten bauen auf SoilML[3] auf und berücksichtigen die Anforderungen aus dem OGC Standard *Observations and Measurements*.

Metadaten und Daten ergänzen sich

Insgesamt lässt sich feststellen, dass die Spezifikationen für Metadaten und Daten auf einem guten Weg sind, die in Kapitel 4 formulierten Anforderungen für Datennutzer aus Klimasystemforschung, Klimafolgenforschung und -anpassung zu erfüllen. Für die Einschätzung der korrekten Datennutzung benötigt der Nutzer ggf. Informationen, die über die aktuellen Metadatenprofile hinausgehen, wie z.B. Informationen über bodenphysikalische und chemische Parameter. Daten, die in den künftigen Standards ausgetauscht werden, sollten diesen Ansprüchen genügen. Das zeigen jedenfalls die Erfahrungen aus den ISO-Metadaten einerseits und Daten, die SoilML-konform sind, andererseits.

---

3 http://eusoils.jrc.ec.europa.eu/esdb_archive/eusoils_docs/Poster/montanarella_EGU2010_XML.pdf

Das BOKLIM-Umsetzungskonzept baut auf den aktuellen ISO-, INSPIRE- und GS Soil-Aktivitäten zur Kodierung von Bodendaten auf.

Normative Referenzen

ISO 19109 Geographic Information – Rules for Application Schemas

ISO 19115 Geographic information — Metadata

ISO 19119 Geographic information — Services

ISO 19139 Geographic information — Metadata — XML schema implementation.

ISO 15903 Soil quality -- Format for recording soil and site information

ISO 25177 Soil quality -- Field soil description

ISO/CD 282 58 Soil quality — Digital exchange of soil-related data

OGC OpenGIS Catalogue Services Specification 2.0.2 -ISO Metadata Application Profile.

Technical Guidance to implement INSPIRE Discovery Services http://inspire.jrc.ec.europa.eu/index.cfm/pageid/5

4.3.4 Technische Anforderungen

Um die Anforderungen der Akteure angemessen berücksichtigen zu können, werden im Folgenden technische Anforderungen an die Datenbereitstellung festgestellt. Die Ausführungen dienen v.a. dazu den Stand der Technik sowie absehbare Entwicklungstendenzen in der relevanten informationstechnischen Bereichen darzustellen, soweit sie für eine effiziente Datenbereitstellung von klimarelevanten Bodendaten erforderlich sind.

Technische Anforderungen bei der Bereitstellung

Die Anforderungen der Akteure zielen auf eine effiziente Datenbereitstellung, d.h. Daten sind so bereitzustellen, dass sie ohne großen Aufwand gemeinsam mit vergleichbaren Daten weiterverarbeitbar sind. Man spricht dann von Interoperabilität.

Für die erforderlichen informationstechnischen Komponenten besteht die Anforderung, dass sie sich auf Standards stützen, die allgemein verständlich sind. Technische Standards bieten einen informationstechnischen Rahmen die fachlichen Standards digital zu kodieren, d.h. für Computer verarbeitbar zu machen. Fachliche Standards bestehen aus fachlichen Festlegungen und Vereinbarungen, wie Sachverhalte beschrieben werden sollen und wie eine Vergleichbarkeit für unterschiedliche Fachkonzepte zu erreichen ist.

Diese Standards werden in **Dienste-orientierten Architekturen** (SOA, s. Begriffe) in einem grundlegenden Publish-Find-Bind Muster umgesetzt (s. KOORDINIERUNGSSTELLE DER GEODATENINFRASTRUKTUR DEUTSCHLAND 2010, S. 19 f.). Demnach veröffentlichen Datenprovider ihre bereitgestellten (Geo-)Datendienste oder andere Ressourcen, in dem sie diese in den Metadatenkatalogen, die über Suchdienste erschlossen werden, registrieren (publish).

Anwender suchen in Such- oder Katalogdiensten nach vorhandenen (Geo-) Datendiensten, die innerhalb der Kataloge einheitlich über Metadaten beschrieben sind. Als Ergebnis erhalten die Anwender ein Suchergebnis (Liste an gefundenen Treffern) (find). Anhand der Trefferliste können die Anwender einen gefunden Dienste ansprechen und unter Berücksichtigung der Nutzungsbedingungen verwenden (bind) (s. Abb. 4.2).

Im Architekturkonzept der Geodateninfrastruktur Deutschland wird anschaulich die daraus resultierende Dienste-orientierte Dateninfrastruktur dargestellt (s. Abb. 4.3). Sie zeigt, dass die in einzelnen Diensten vorliegenden Ressourcen (Datenprodukte) über verteilte Dienste mit standardisierten Schnittstellen interoperabel bereitgestellt werden. Die Schnittstellen können über Anwendungen und Portale angesprochen, konsumiert und ressourcenübergreifend ausgewertet werden.

Konkret bedeutet das für den Anwendungsfall BOKLIM, dass die einzelnen Informationstöpfe an unterschiedlichen Stellen und von unterschiedlichen Institutionen bereitgestellt werden können und trotzdem miteinander kommunizieren können. Metadaten könnten zentral an einer Stelle für alle relevanten Daten vorgehalten werden, oder über Katalogdienste der Datenprovider ausgetauscht bzw. kommuniziert werden. Messdaten könnten ebenfalls zentral oder dezentral in unterschiedlichen Datenbanken abgelegt sein und über unterschiedliche Portale (pflegend oder recherchierend) erschlossen werden. Voraussetzung ist auch hier deren Bereitstellung in standardisierten Austauschformaten (z.B. SoilML). D.h. Datenprovider können sich – lässt man finanzielle und organisatorische Rahmenbedingungen einmal außen vor - aus technischer Sicht frei entscheiden, ob sie für ihre Daten eigene Dienste entwickeln bzw. bereitstellen oder ob sie sich bereits bestehenden Infrastrukturen bedienen.

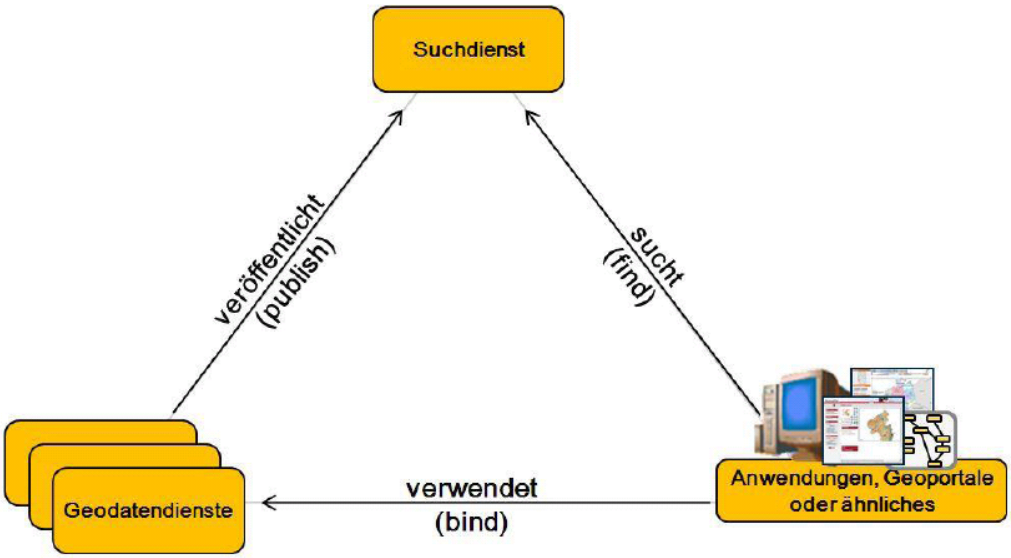


Abb. 4.2: Publish-Find-Bind-Muster einer Dateninfrastruktur (Quelle: KOORDINIERUNGSSTELLE DER GEODATENINFRASTRUKTUR DEUTSCHLAND 2010 4-1, S. 20)

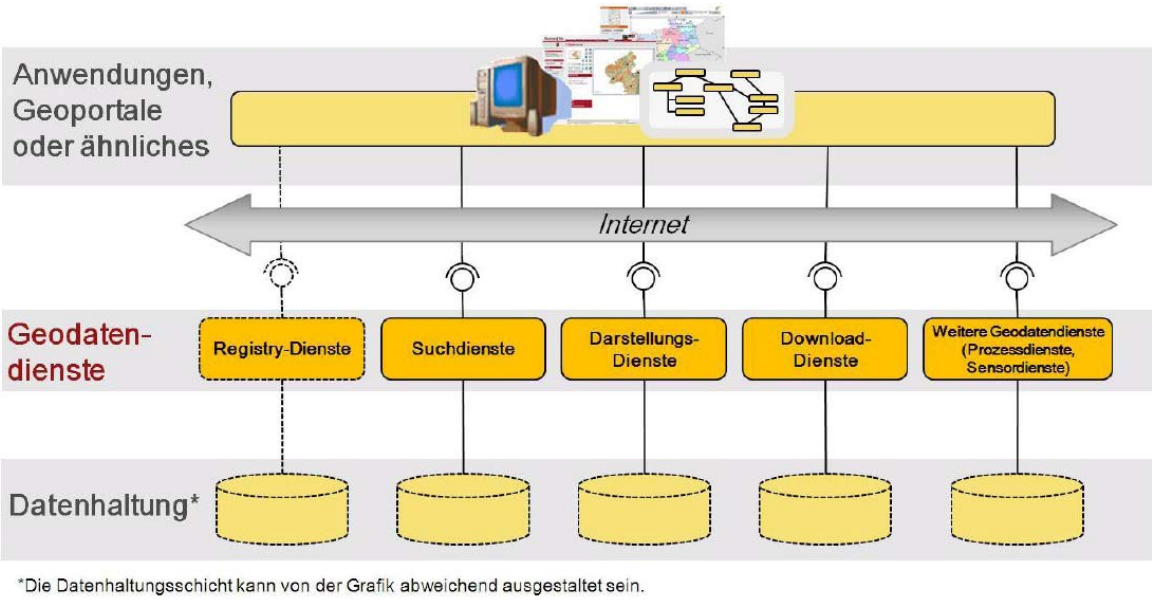


Abb. 4.3: Beispielarchitektur GDI-DE (Quelle: Koordinierungsstelle der Geodateninfrastruktur Deutschland 2010 4-1, S. 20)

Bestimmte Katalog-/Suchdienste - OGC-konforme Catalogue Services Web (CSW) - verfügen über die Fähigkeit, Informationen von anderen CSW zu **ernten** („**Harvesting**“). Das heißt, die Metadatensätze anderer CSW-Dienste werden erschlossen und weiterverbreitet. Im Portal U kann dies nachvollzogen werden, denn dort ist für jeden Metadaten-Eintrag der jeweilige Quellkatalog angegeben („Quelle: …“). Das Ernten von Einträgen führt dazu, dass Katalogdienste nicht zwingend zentral gepflegt werden müssen. Sie können problemlos dezentral verwaltet werden, wenn sie standardisierte Einträge enthalten, d.h. die gleichen Metadatenelemente in der gleichen Kodierung.

Technische Standards

Die relevanten technischen Standards für Dateninfrastrukturen liegen weitgehend vor. Im Bereich der Metadaten stützen sich alle aktuellen Infrastrukturprojekte - so auch INSPIRE - auf die Standards der ISO (ISO TC 19115 für Datensammlungen und ISO TC 19119 für (Daten-)Dienste. Für die Bereitstellung der Daten (Messdaten, Boden-Flächendaten) werden standardisierte Downloaddienste des Open Geospatial Consortiums (OGC) verwendet: Web Feature Services für die auswertbare Bereitstellung von Geoobjekten (Features) und ihrer Sachdaten, Web Coverage Services für georeferenzierte Rasterdatensätze und Sensor Observation Services für Messwerte an Messstellen oder Sensoren. Die OGC Services erlauben es Daten in Form von Geo-Objekten (Features), als Rasterdateien (Cover) oder als Messdaten einer Messstelle (Sensoren) bereitzustellen.

Tab. 4.5: Überblick über die erforderlichen Elemente und Standards im Kontext einer recherchierbaren Dateninfrastruktur für klimarelevante Bodendaten

	Technische Standards	Fachliche Standards	Anforderungen der Nutzer und Provider
Suchdienst für Metadaten	Metadatenstandards ISO TC 19115/19119 ISO TC 19139 INSPIRE-Vorgaben OGC Catalogue Service Web	Fachliches Metadatenprofil (aufbauend auf GS Soil)	Welche Metainformationen benötigt werden, fließen in das fachliche Profil ein
Daten- oder Downloaddienst für georeferenzierte Messdaten und Boden-Flächendaten	OGC Datendienste: Web Feature Service, WebCoverage Service, Sensor Observation Service	Fachliches (semantisches) Applikationsschema für bodenkundlicher Messdaten im Kontext des Klimawandels ISO TC 19109 / 19136 (Fachschema)	Wie Daten in vorhandenen Datenbanken kodiert sind, fließt in das fachliche Applikationsschema ein
Anwendungen und Portale	Fähigkeit technisch standardisierte Schnittstellen kommunizieren zu können	Fähigkeit fachliche Standards verarbeiten zu können	Individueller Zuschnitt der Anwendungen/Portale an die Anwenderwünsche

Entsprechende fachliche Standards können als Erweiterung der technischen Vorgaben angesehen werden. Es werden zusätzliche Fachinformationen definiert, die über die technischen Standards hinausgehen. Im Falle der Metadaten erfolgt dies über die Definition eines **Fachlichen Metadatenprofils**. Dies kann innerhalb des technischen Standards von ISO TC 19115/19119 erfolgen[4] oder es wird die Möglichkeit genutzt, spezifische eigene Metadatenelemente zu ergänzen.

Solche fachlichen Standards entstehen derzeit im Rahmen der Ausgestaltung der INSPIRE-Richtlinie innerhalb mehrere Initiativen und werden in den folgenden Kapiteln eingehend diskutiert (s. Kap. 4.5). In Tabelle 4.5 sind sie aufgelistet.

Fazit:

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass folgende Anforderungen bei der Konzeption eines Zielsystems bzw. beim Umsetzungskonzept von maßgeblicher Bedeutung sind:

[4] Hier stehen etwa 400 Metadatenelemente zur Beschreibung der Datensammlungen/Dienste zur Verfügung

Tab. 4.6: Maßgebliche Anforderungen

	Aufgabe	Akteure	Priorität
Bereich Metadaten:			
▪ Standards für die Metadatenbereitstellung/ Metadatenkatalog ▪ Fachliches Metadatenprofil für Bodenmessdaten (Schwerpunkt von BOKLIM) ▪ Fachliches Metadatenprofil für Boden-Flächendaten	Recherche	Zuständige Bundesbehörden	1
▪ Metadaten zu den Datenbeständen	Erfassung	Datenprovider	1
▪ Geeignetes Metadatenportal zur Erfassung und Recherche	Erfassung, Recherche	Service-/ Portaldienstleister	1
▪ Möglichkeit, andere standardkonforme Metadatenkataloge einzubinden („Ernten“)	Recherche	Service-/ Portaldienstleister	2
Bereich Messdaten			
▪ Datendienste und Portale, die Bodenmessdaten bereitstellen (ggf. unstandardisiert)	Recherche	Service-/ Portaldienstleister	2
▪ Datendienste mit standardisierten Kommunikationsschnittstellen	Recherche, Erfassung	Service-/ Portaldienstleister	3
▪ Semantisches Applikations-Fachschema für Bodenmessdaten	Recherche	Zuständige Bundesbehörden	3
▪ Datenportale, die standardisierte Datendienste bereitstellen	Recherche	Service-/ Portaldienstleister	3

Normative Referenzen

INSPIRE: Technical Guidance to implement INSPIRE Download Services

INSPIRE: Technical Guidance to implement INSPIRE View Services

ISO 19109 Geographic information — Rules for application schema

ISO 19128:2005 Geographic information – Web map server interface

ISO 19142:2010 Geographic information -- Web Feature Service

ISO 19156, Geographic Information – Observations and measurements

OGC-WMS Version 1.3, OpenGIS Web Map Service (WMS) Implementation Specification

OGC-WFS Version 2.0, OpenGIS Web Feature Service (WFS) Implementation Specification

OGC-WCS Version 2.0, OpenGIS WCS - Web Coverage Service

OGC-O&M Version 1.0.0, Observations and Measurements
- Part 1 - Observation Schema
- Part 2 - Sampling Features

4.4 Metadaten und Metadatenportale

4.4.1 Metadaten – Begriffsbestimmung und technische Strukturen

Als Metadaten oder Metainformationen bezeichnet man allgemein Daten, die Informationen über andere Daten (z.B. Messdaten-Sammlungen, Bodenkarten) enthalten. Sie werden in der Literatur häufig als ‚Daten über Daten' bzw. ‚beschreibende deskriptive Daten' beschrieben. Metadaten können für einzelnen Geoobjekte (z.B. Messstellen, Erhebungspunkte) oder ganze Datensätze dokumentiert werden. Zunächst soll es hier um Metadaten auf Ebene von Datensätzen (Datensammlungen) gehen. Metadaten zu den einzelnen Geoobjekten sind deutlich näher an den Downloaddiensten zu den eigentlichen Messdaten. Sie stehen aktuell nicht im Fokus der Betrachtung, sind aber für spätere Konzeptionsphasen einer effizienten Datenbereitstellung im Kontext der dann vorliegenden normativen Regelungen näher zu betrachten.

HUBER (2001) unterscheidet drei Arten oder Aufgaben von Metadaten:

Inventar: Metadaten helfen bei der Organisation und Pflege des eigenen Datenbestands

Katalog: Metadaten bieten externen Nutzern Informationen zu diesen Datenbeständen und wie diese verfügbar gemacht werden

Dokumentation: Metadaten enthalten ggf. Informationen zur möglichen Weiterverarbeitung und Interpretation von Daten

Aus Fachdaten werden erst dann verarbeitbare Daten für Anwendungen wie z. B. GIS oder Statistikanwendungen, wenn diese ausreichend genau durch Metadaten erfasst und beschrieben sind (HUBER 2001). Erst dann können für entsprechende Fragestellungen relevante Fachdaten ermittelt und deren Inhalte verstanden werden. Ohne diese Voraussetzungen können Daten auch nicht korrekt eingesetzt werden. Insbesondere (zumeist kodierte) digitale Daten sind ohne Zusatzangaben (Metainformationen) praktisch nicht verwertbar. Die Rolle ausreichend genauer Metainformationen erscheint umso wichtiger, je häufiger solche Datensammlungen in randlichen bzw. neuen Anwendungsgebieten nachgefragt werden (im Gegensatz zu den Zielen bei der ursprünglichen Datenerfassung). Brauchbarkeit, Nutzen und Datenlücken können somit schneller auf der Metadatenebene gelöst werden.

Im Kontext Klimafolgenforschung und -anpassung müssen demnach bodenkundliche Datenbestände soweit beschrieben werden, dass potentielle Anwender deren Eignung für den angestrebten Auswertungszweck bzw. die ausgewählte Methodik beurteilen können. Es wird daher überprüft, inwiefern die existierenden Standards ausreichend sind, oder ob diese vor dem Hintergrund der fachlichen Anforderungen erweitert werden müssen.

Struktur von Metadatenkatalogen und Metadatenportalen

Für Katalog- oder Suchdienste, in denen Internetnutzerinnen und -nutzer nach Begriffen suchen können, werden Metadaten in Katalogen verwaltet.

Der Aufbau solcher Metadatenkataloge lässt sich wie folgt beschreiben:

- Grundlage für eine Metadatenkatalog ist eine einheitliche Struktur, die vorgibt, welche Informationen der Datenbestände als Metadaten dokumentiert werden sollen. Hierzu kann man ein individuelles (Daten-)Modell erstellen oder sich an gegebene **Metadatenstandards** anlehnen. Diese Standards liefern einen Satz von Metadatenelementen, die als Pflichtelemente (Kern-Metadaten), konditionale Pflichtfelder oder freiwillige Felder gekennzeichnet sind.
- **Metadatenelemente** sind die kleinste Einheit von Metadaten. Sie beschreiben einzelne Eigenschaften zu den Datenobjekten, z.B. Bezeichnung des Datensatzes, Datenbesitzer, Aktualität, Raumbezug etc.
- In einem Metadatenprofil kann festgelegt werden, welche Metadatenelemente in einem Katalog verwendet werden sollen, ob es sich um Pflichtelemente handelt und wie diese gefüllt werden sollen. Profile können auch zusätzliche individuelle Elemente festlegen.
- Alle in einem Profil festgelegten Metadatenelemente werden pro Datensatz dokumentiert und bilden dann einen **Metadatensatz**.
- Der Metadatenkatalog ergibt sich dann aus der Summe der Metadatensätze.
- Um Metadatenkataloge zu publizieren, werden, wie in Kapitel 4.3.4 dargestellt, **Such- oder Katalogdienste** etabliert, die die entsprechenden Metadaten dann über standardisierte Schnittstellen bereitstellen.

- Diese Schnittstellen werden von den **Metadatenportalen** oder **Anwendungen** „angesprochen“ und „konsumiert“ (s. auch Kapitel 4.5).

4.4.2 Vorschlag eines Metadatenprofils für Bodenmessdaten

Um Recherchen nach geeigneten Bodendaten effizienter gestalten zu können, müssen zunächst Vorgaben gemacht werden, wie Datensammlungen mit Metadaten zu dokumentieren sind, damit die Anwender fachlich sinnvolle Suchanfragen stellen können. Dazu wird hier ein geeignetes Metadatenprofil für klimarelevante Bodenmessdaten vorgeschlagen. Dies kann als Diskussionsbasis für weitere Abstimmungsgespräche zwischen den zuständigen Behörden und weiteren Akteuren dienen.

Technische Standards und anwendungsspezifische Profile

Um Metadaten vergleichen zu können, müssen diese standardisiert dokumentiert werden. In allen relevanten Infrastrukturprojekten hat sich die ISO 19115 für (Geo-Daten) und die ISO 19119 für (Geo-)Datendienste als Standard durchgesetzt. ISO 19139 übersetzt diese in ein entsprechendes XML Schema. Diese Standards bieten die Möglichkeiten entsprechende Datenressourcen mit

1. etwa 20 Pflicht-Kernmetadatenelementen,
2. insgesamt über 400 Metadatenelementen
3. sowie zusätzlich individuell definierbaren zusätzlichen Metadatenelementen

zu dokumentieren.

INSPIRE greift die ISO Standards auf und definiert ein eigenes Kernmetadatenprofil, das sich weitgehend mit dem ISO Kernbereich („Core“) und vollständig mit dem Gesamtumfang von ISO 19115/19119 deckt (s. Abb. 4.4).

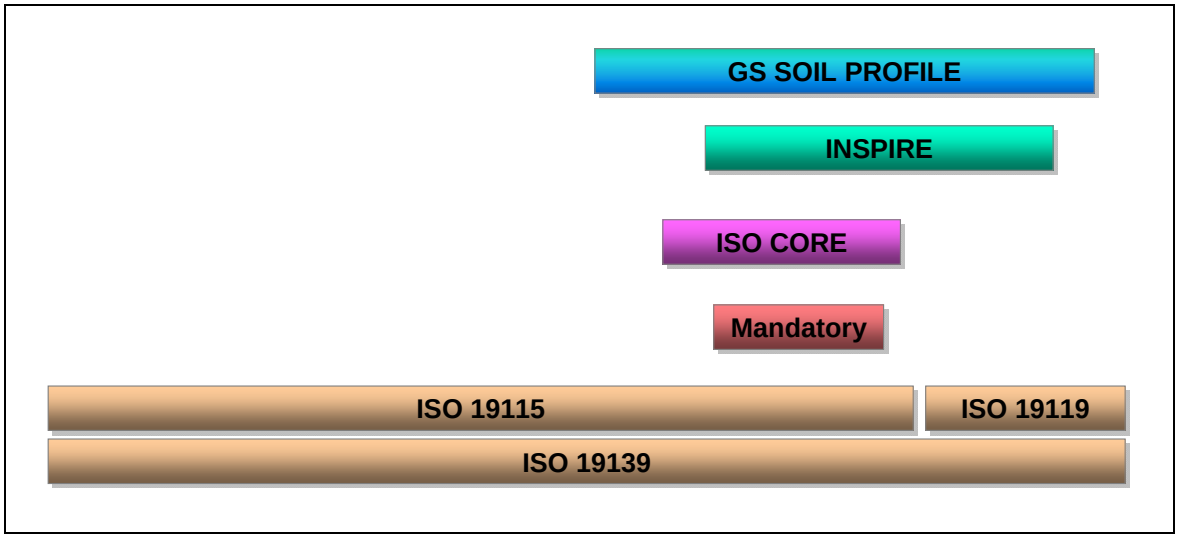


Abb. 4.4: Überschneidungsbereiche unterschiedlicher Metadatenprofile (Quelle: Tomáš Řezník (GS Soil, D3.1/D3.2, 2010))

Metadatenprofil in GS Soil

Im GS Soil Projekt (nähere Informationen siehe Kap. 4.5.2) wird aktuell ein Profil für den Bereich Bodendaten (mit Schwerpunkt bodenkundliche Geodaten und Karten) vorgeschlagen, welches sowohl die ISO-Kernmetadaten, als auch INSPIRE-Kernmetadaten umfasst und projektspezifische Elemente aus den ISO Standards ergänzt. Ein Metadaten-Entwurf aus GS Soil ist am Beispiel einer Bodenkarte in Abbildung 4.5 dargestellt.

Der aktuelle GS Soil Vorschlag eines Metadatenprofils geht davon aus, dass sich bodenkundlich-inhaltliche Beschreibungen teilweise im rein textlich kodierten Metadatenelement „Abstract“ wiederfinden (z.B. Liste der verfügbaren Parameter, Messdatendichte, Repräsentanz etc.). Der GS Soil Vorschlag wurde als sog. Referenzmaterial in den INSPIRE Prozess eingebracht. Die Thematic Working Group Soil unter INSPIRE hat diesen Vorschlag aufgegriffen. Der Grad der Realisierung kann aber erst in der bevorstehenden Version 2 der Datenspezifikationen abgelesen werden. Das Metadatenprofil für BOKLIM orientiert sich am Vorschlag von GS Soil.

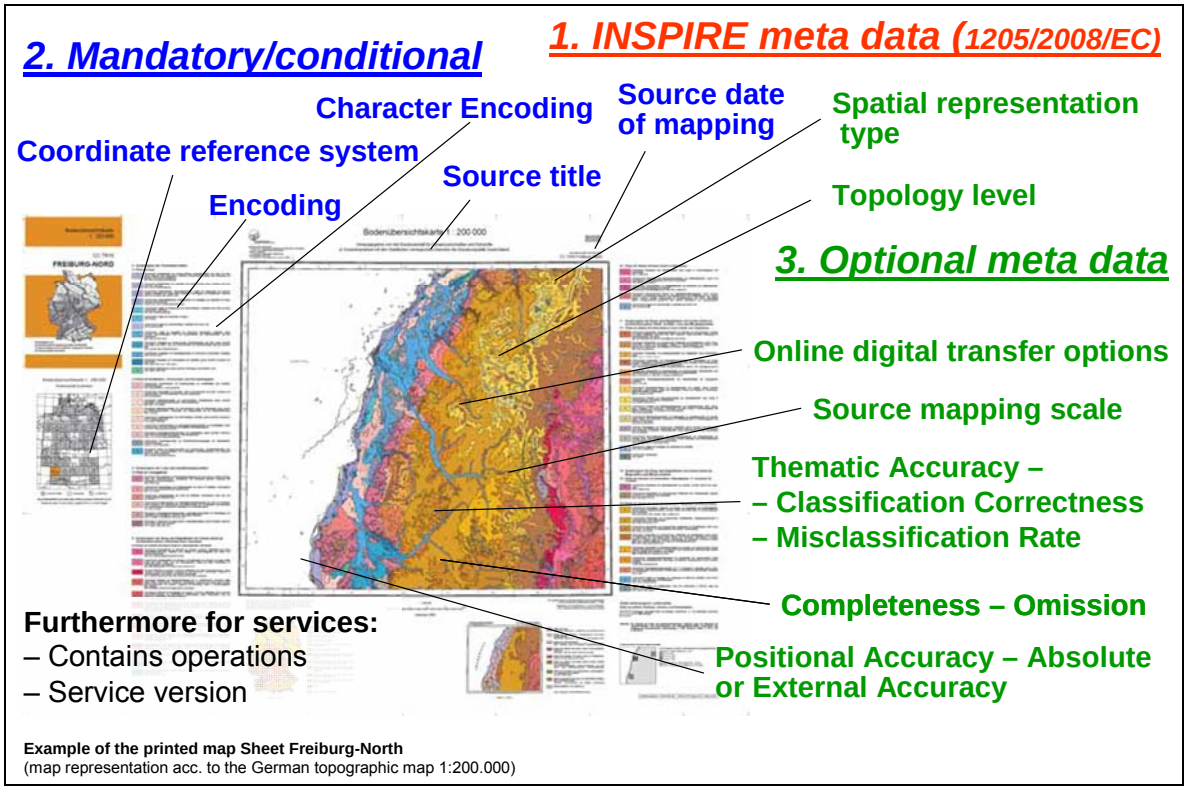


Abb. 4.5: Beispielhafte Metadatenelemente im GS Soil Metadatenprofil, dargestellt anhand einer Karte

Entwurf eines BOKLIM-Metadatenprofils für Bodenmessdaten

Im Fokus des Projekts stehen spezielle bodenkundliche Messdaten aus Bodenmonitoring und Bodenzustandserhebung, die über definierte Fragen für Anwendungen in der Klimasystemforschung, Klimafolgenforschung und –anpassung recherchierbar gemacht werden sollen. Daher ist die Definition eines möglichst allgemeingültigen, aber anwenderspezifischen Metadatenprofils zu erarbeiten.

In folgenden Arbeitsschritten wurde ein Vorschlag für ein Metadatenprofil für Bodenmessdaten erarbeitet („BOKLIM-Metadatenprofil“):

1. Zusammenstellung der maßgeblichen technischen Standards (ISO, INSPIRE)
2. Analyse der fachlichen Anforderungen aufgrund vorliegender Ergebnisse der Projekte GS Soil und BOKLIM (eine wichtige Grundlage sind die Datenbeschreibungen in Steckbriefen, vgl. Kap. 3.1.1)

3. Abgleich mit den Metadatenelementen in Portal U
4. Erstellung einer Liste von geeigneten Metadatenelementen

Indem eine Zusammenschau der oben angeführten Metadatenprofile vorgenommen wurde, ist eine Konformität zu den aktuell vorliegenden fachlichen und technischen Standards gegeben.

Das BOKLIM-Metadatenprofil ist in Anlage 4 dargestellt. Das Profil ist aus Metadatenelementen des derzeit bei GS Soil diskutierten Vorschlags (Tomáš Řezník, GS SOIL, 2010a, 2010b), des ISO 19115-Standards, der INSPIRE Kernmetadaten (EU Commission, 2008) und des Portal U Metadatenmodells (Koordinierungsstelle Portal U, 2005) aufgebaut. Es enthält Angaben

1) zum Metadatensatz,

2) zur Datensatzbeschreibung,

3) zu Einschränkungen,

4) zu Herkunft, Datenqualität, Pflege,

5) zu räumlicher Datenstruktur und zum Referenzsystem,

6) zu Inhalt, Darstellungskatalog, Vertrieb,

7) zu Ausdehnung, Bibliographische Angaben und verantwortliche Stelle sowie

8) zu Untersuchungsmethoden und Parameter.

Während sich die Metadatenelemente in den o.g. Punkten 1) bis 7) aus den allgemeinen Standards von ISO, bzw. INSPIRE und deren praktischen Umsetzung innerhalb von Portal U ableiten, handelt es sich bei den Elementen des achten Punktes um Ergänzungen für die hier betrachteten Datensammlungen aus Bodenmonitoring und Bodenzustandserhebung. Solange noch keine fachspezifischen Metadatenelemente aus den INSPIRE-Spezifikationen zu Bodendaten gemäß Annex III vorliegen, ermöglichen diese eine Recherche nach Untersuchungsparametern anhand der vorgesehenen Metadatenelemente. Aus dem derzeit diskutierten Metadatenentwurf von GS Soil wurden

nicht alle Elemente in den BOKLIM-Vorschlag übernommen (vgl. Anlage 4). Neben den in Anlage 4 genannten Elementen wurden zudem zwei Elemente aus GS Soil nicht übernommen, um den Aufwand der Erfassung in Grenzen zu halten. Hier handelt es sich um die Elemente 1.1.10 Data Quality – Completeness – Omission (Datenqualität – Vollständigkeit – Auslassungen) und 1.1.12 Data Quality – Thematic accuracy – Thematic classification correctness (Datenqualität – Thematische Genauigkeit / Richtigkeit), die aus Sicht der Autoren verzichtbar sind. Hier sollte aus Nutzersicht geprüft werden, ob diese Elemente in das BOKLIM-Metadatenprofil aufgenommen werden sollten.

Das BOKLIM-Metadatenprofil umfasst insgesamt 41 Metadatenelemente, davon sind werden 24 als verpflichtend (mandatory), 5 als bedingt verpflichtend (conditional)[5] und 12 als wahlweise (optional) vorgeschlagen. Ein kleiner Teil der bodenspezifischen Angaben ist zwar mehrfach pro Datensatz auszufüllen (parameterspezifische Elemente, die je Mess-Variable auszufüllen sind). Bestimmte Elemente werden jedoch automatisch ausgefüllt, da es sich um systeminterne Metadaten handelt (z.B. Sprache der Metadaten, siehe Metadatenelemente 1-7 in Anl. 4).

Der Ansatz, parameterspezifische Elemente in ein Metadatenprofil aufzunehmen, ist vor der Umsetzung nochmals eingehend in Fachkreisen zu diskutieren, sobald entsprechende Vorschläge aus den Facharbeitsgruppen aus den anderen Initiativen (GS Soil, INSPIRE etc.) vorliegen. Für stoffliche Parameter sollte – zusätzlich zum GS Soil-Vorschlag - das untersuchte Medium mitgeführt werden (z.B. Boden-Feststoff, Boden-Lösung) (siehe Metadaten-Element Nr. 42). Wie die parameterspezifischen Elemente schließlich angelegt werden, d.h. als einzelne Elemente oder in strukturierter Form im Feld „Kurzbeschreibung/Abstract“ wie in GS Soil in der Diskussion, kann zu einem späteren Zeitpunkt entschieden werden. Hier wird zunächst festgestellt, welche Elemente für sinnvolle Recherchen der Datennutzer im Bereich der Klimaforschung, Klimafolgenforschung und Anpassung mindestens benötigt werden.

---

[5] Element muss unter festgelegten Bedingungen (conditions) angegeben werden (z.B. für bestimmte Datentypen).

Auf zusätzliche, fach- oder datenspezifische Elemente (z.B. Anwendungsbereich in der Klimaforschung, beteiligte Arbeitsgruppen/-gremien) wird verzichtet, um den Erfassungs- und Pflegeaufwand zu begrenzen.

4.5 Aktuelle und zukünftige Dateninfrastrukturen

In den vorangegangen Kapiteln lag der Schwerpunkt auf den Datensammlungen relevanter Bodendatenerhebungsprogramme sowie auf Anforderungen und wie diese umzusetzen sind. Nachdem die technischen Grundlagen hierfür gelegt wurden, werden nun aktuelle und zukünftige Dateninfrastrukturen sowie Portale beschrieben. Während eine Dateninfrastruktur die technischen Systeme und Komponenten für die Datenhaltung und den Datenaustausch beinhaltet, dienen Portale als Plattformen für die Datenbereitstellung und -suche. Die betrachteten Systeme greifen die aktuellen Entwicklungen aus INSPIRE, OGC und ISO auf.

Im Kontext des BOKLIM-Projektes werden folgende Dateninfrastruktur-Projekte und Portale als relevant erachtet:

- Die europäische Geodateninfrastruktur (ESDI), die nach der INSPIRE-Richtlinie aufgebaut wird,
- Die Geodateninfrastruktur Deutschland (GDI-DE), die INSPIRE via Geodatenzugangsgesetze des Bundes und der Länder in Deutschland umsetzt,
- Das PortalU als das zentrale Umweltportal der bundesdeutschen Umweltverwaltung von Bund und Ländern in Deutschland. Es stellt vorwiegend Umweltdaten bereit.
- GS Soil als aktuelles Forschungsprojekt zum Aufbau einer INSPIRE kompatiblen Geodateninfrastruktur für europäische Bodendaten (einschl. eines auf der Portal U-Software InGrid aufbauenden internationalen Boden-Portals).

Die Geodateninfrastrukturprojekte zielen primär nicht auf Bodenmessdaten (Analysedaten mit Standort-, Bodenprofil- und Probenahmedaten) und entsprechende Downloaddienste, sondern unterstützen v.a. auch andere Umweltbereiche, Fachdomänen/Ressorts (z.B. Verkehrsdaten, Topographische Daten). Des Weiteren handelt es sich vorwiegend um Geodateninfrastrukturen mit einem Schwerpunkt auf Darstellungs-

diensten für Geodaten bzw. Karten über Web Map Services. Downloaddienste für diese Daten sind in Entstehung (GS Soil). Portal U hat seinen Schwerpunkt eher auf dem Metadatenkatalogen (Suchdienst).

Die Analyse soll die Relevanz der Infrastrukturprojekte für die Themenfelder Bodenschutz und Klimawandel aufzeigen und mögliche Einsatzfelder von Komponenten aufzeigen.

Tabelle 4.7 gibt einen Überblick über die in den Infrastrukturprojekten vorhandenen und perspektivisch zu erwartenden Spezifikationen. Es gilt festzuhalten, dass Metadaten zu bodenkundlichen Messdaten / Datensammlungen derzeit nur in Portal U verzeichnet sind. Entsprechende Daten sollen künftig aber auch über INSPIRE/ESDI bereitgestellt werden. Folglich dürften entsprechende Dienste auch im Rahmen der GDI-DE entstehen. Entwürfe für Fachschemata liegen aktuell nur in GS Soil für Bodenkarten vor. Spezifikationen für bodenkundliche Messdaten entstehen derzeit innerhalb von GS Soil und im INSPIRE Kontext (Fachschemata mit Codelisten). Die ersten zwischen den unterschiedlichen Arbeitsgruppen abgestimmten Versionen der Spezifikationen für bodenkundliche Messdaten sind für Mitte 2011 angekündigt.

Tab. 4.7: Übersicht und Erläuterung der einzelnen Infrastrukturprojekte

	INSPIRE/ESDI	GDI-DE	Portal U	GS Soil
Ressort/Fachdomäne	Umwelt	Inneres	Umwelt	Boden
Inhaltlicher Schwerpunkt	umweltrelevante Geodaten für Europa	Geodaten für Deutschland	Metadatensuchmaschine für Umweltdaten und Kartendienste Deutschland	INSPIRE-konforme bodenkundiche Geodatendienste
Metadaten Boden (Karten/Messdaten)	X / P	X / -	X / **X**	**X** / -
Bodendaten (Karten/Messdaten)	X / **P**	X / **P**	X / -	X / -
Fachschema Boden (Karten/Messdaten)	P / **P**	- / P	- / -	X / -

X = vorhanden
P = Perspektivisch vorhanden, in Arbeit oder geplant
- = nicht vorhanden, nicht vorgesehen
fett sind die aktuell maßgeblichen Referenzen (Vorgaben bzw. Implementierungen) für BOKLIM

4.5.1 INSPIRE/ESDI

Wichtige Grundlagen zu INSPIRE wurden bereits im Kapitel Rechtliche Anforderungen dargestellt. Wichtige Aspekte, die für die Einstufung bzw. Bewertung aktueller und künftiger Infrastrukturen hilfreich sind, werden nachfolgend ergänzt.

Die INSPIRE-Initiative mit der entstehenden europäischen Geodateninfrastruktur (ESDI) kann als strukturgebendes Element für die nationalen Umsetzungsinitiativen betrachtet werden. Sie speist sich hierarchisch aus den Geodateninfrastrukturen der Mitgliedsstaaten und deren nachgeordneten behördlichen Instanzen (Länder, Kommunen, s. Abb. 4.6). Die darin enthaltenen Dienste müssen im Sinne der technischen Ausführungen in Kapitel 4.3.4 nicht ursächlich in diese Infrastrukturen bereitgestellt werden, sondern können zumindest prinzipiell auch bei den Datenprovidern selbst liegen, sofern diese die technischen Anforderungen an Verfügbarkeit, Zugriffszeiten etc. erfüllen können.

Die INSPIRE Richtlinie unterscheidet Suchdienste von Darstellungsdiensten, Download- und Prozessierungsdiensten (z.B. Koordinatentransformationsdienste). Für BOKLIM ist v.a. die zukünftige Realisierung von Downloaddiensten, die einen direkten Zugriff und das Herunterladen von Daten ermöglichen von besonderem Interesse.

Abb. 4.6: GDI-Hierarchie in Europa (Quelle: Koordinierungsstelle der Geodateninfrastruktur Deutschland 2010)

INSPIRE liefert darüber hinaus maßgebliche Vorgaben (technische Spezifikationen), wie Metadaten und Daten künftig bereitzustellen sind. Besonders relevant für BOKLIM sind dabei die Standards zur Bereitstellung von bodenkundlichen Messdaten inkl. Standort-, Bodenprofil-, Probenahme- und Analysedaten.

4.5.2 GDI-DE / Geoportal Bund

Die Geodateninfrastruktur in Deutschland (GDI-DE) ist den europäischen Kontext eingebettet. Sie wird von Bund, Ländern und Kommunen sowie der Wirtschaft gemeinsam aufgebaut und orientiert sich an den Anforderungen von INSPIRE zum Aufbau einer Europäischen Geodateninfrastruktur. Die gesammelten Geodaten sind über das Geoportal des Bundes verfügbar.

Einige Eckpunkte der GDI-DE sind:

- Die GDI-DE implementiert INSPIRE (Federführung BMU).
- Die Bundesländer liefern dazu über ihre länderspezifischen GDIs zu (z. B. GDI-NRW; GDI-BB etc.).
- Alle verpflichteten Institutionen beliefern in die Länderkataloge.

Letztlich resultiert aus INSPIRE eine Datenbereitstellungskaskade von der lokalen bis zur europäischen Ebene. Dies betrifft sowohl die Geofachdaten als auch die dazugehörenden Metadaten. Dabei wird ausdrücklich darauf hingewiesen, dass Nutzungsrechte und –einschränkungen gewährleistet bleiben. Wichtig ist dabei festzuhalten, dass über das Geoportal des Bundes auch die Metadaten zu den in PortalU verzeichneten Bodeninformationen recherchierbar sind, weil diese aus den PortalU Katalogdiensten „geerntet“ werden können (s. folgende Abbildungen).

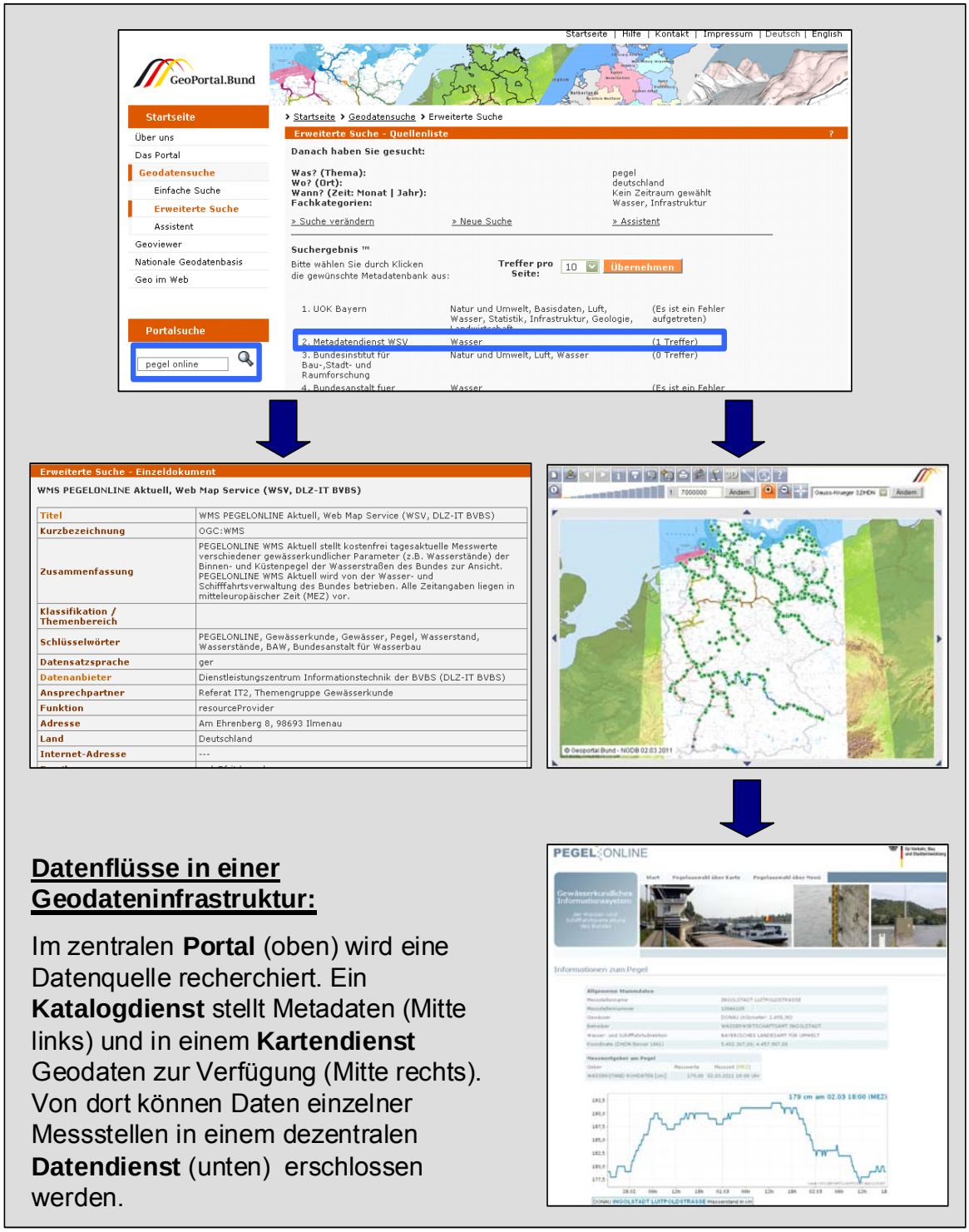
Die Möglichkeit des „Erntens“ (*harvesting*: automatisches Auffinden von Web-Diensten im Kontext eines Suchbegriffes) wird nachfolgend in Bildschirmsichten am Beispiel des Suchbegriffes „FisBo“ der BGR dargestellt, weil diese Datenbank in mehreren Portalen recherchierbar ist. Das Beispiel zeigt, wie die entsprechenden Metadateneinträge von Portal U aus in den anderen Systemen geerntet werden bzw. über Schnittstellen überführt wurden.

Abb. 4.6: Recherchieren und „ernten“ (hier Geoportal Bund erntet vom PortalU Metadatenkatalog; online-Ressource: http://www.geoportal.bund.de letzter Abruf 22.02.2011))

Im Hinblick auf die Ziele von INSPIRE soll die GDI-DE so ausgerichtet sein, dass:

- Geodaten auf der optimal geeigneten Ebene gespeichert, zugänglich gemacht und verwaltet werden;
- Geodaten von verschiedenen Nutzern auf unterschiedlichen räumlichen Ebenen und für unterschiedlichste Anwendungen genutzt werden können;
- Geodaten leicht auffindbar sind und auf ihre Eignung hin geprüft werden können und
- die Nutzungsbedingungen für Nutzer übersichtlich erkennbar werden.

Im Rahmen von GDI-DE entstehen derzeit erste Pilotanwendungen für die Integration von Messdaten. Als Beispiel existiert eine Integration von Wasserständen aus dem Portal „Pegel-Online“ der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (www.pegelonline.wsv.de). Die dort verzeichneten Pegel werden als Sensor-Web-Datendienst publiziert und vom Geoportal des Bundes als Web Map Service (Karte) bereitgestellt. Die Pegel sind dann über Karten visualisiert. Per Klick gelangt man weiter zum Datenportal von Pegel-Online. Damit ist die Informationskette von Metadateneinträgen bis zur Möglichkeit messstellenbezogenen Daten herunterladen zu können exemplarisch realisiert worden (s. Abb. 4.8). Das Beispiel zeigt anschaulich, wie heute bestehende zentrale Geodateninfrastrukturen künftig um (ggf. auch dezentrale) Downloaddienste erweitert werden können. Vergleichbare Lösungen sind sehr gut auch für klimarelevante Bodendaten vorstellbar.



Datenflüsse in einer Geodateninfrastruktur:

Im zentralen **Portal** (oben) wird eine Datenquelle recherchiert. Ein **Katalogdienst** stellt Metadaten (Mitte links) und in einem **Kartendienst** Geodaten zur Verfügung (Mitte rechts). Von dort können Daten einzelner Messstellen in einem dezentralen **Datendienst** (unten) erschlossen werden.

Abb. 4.8: Datenflüsse in einer Geodateninfrastruktur (online-Ressourcen: http://www.geoportal.bund.de; http://www.pegelonline.wsv.de, letzter Abruf 22.02.2011)

4.5.3 PortalU

Allgemeine Funktionen

PortalU ist ein Portal zur **Recherche** von Umweltinformationen in Deutschland. PortalU ermöglicht dem Nutzer ein selbstständiges, zielgerichtetes Navigieren in den angebundenen Metadatenbeständen. Die Hauptinformationsquelle für BOKLM-relevante Daten ist der nationale Umweltdatenkatalog (UDK). Er enthält Metadaten zu Datensammlungen/Datenbanken, Diensten/Anwendungen, Dokumenten, Geoinformationen/Karten, Organisationseinheiten sowie Vorhaben/Projekten. Enthaltene Metadatenelemente sind beispielsweise Objektname/-klasse, allgemeine Beschreibung, Auskunftsadresse, Raumbezug, Zeitbezug, Fachbezug. Die einzelnen Fachinhalte, Formate oder Kodierungen werden nicht weiter spezifiziert und können daher teilweise uneinheitlich dokumentiert werden. Damit Metadatenobjekte (Datensammlungen, Dienste, Print-Produkte etc.) wenigstens einheitlich verschlagwortet werden können, wird ein festgelegtes Schlagwertverzeichnis für Umweltdaten („UBA-Thesaurus“) hinterlegt. Dies erleichtert fachspezifische Recherchen.

Die PortalU-Software InGrid ermöglicht u. a. auch die **Eingabe von Metadaten** über den InGrid-Editor (und deren Ausgabe in einem XML-Austauschformat und Weitergabe durch einen Katalog als Webdienst). InGrid kann mehrere Metadatenkataloge (z.B. den UBA-Katalog oder die Kataloge der Länder) verwalten. Über die OGC-Katalogdienst-Funktion des Erntens („**Harvesting**“) ist es möglich die jeweils anderen standardkonformen Metadaten-Katalogdienste zu integrieren. Im Vordergrund steht dabei Portal U als zentrales Instrument für die Metadatendokumentation der deutschen Umweltbehörden, denn von Ihnen stammen die meisten relevanten Datensammlungen.

Zusätzlich enthält Portal U einen **Kartenviewer** für umweltrelevante Karten.

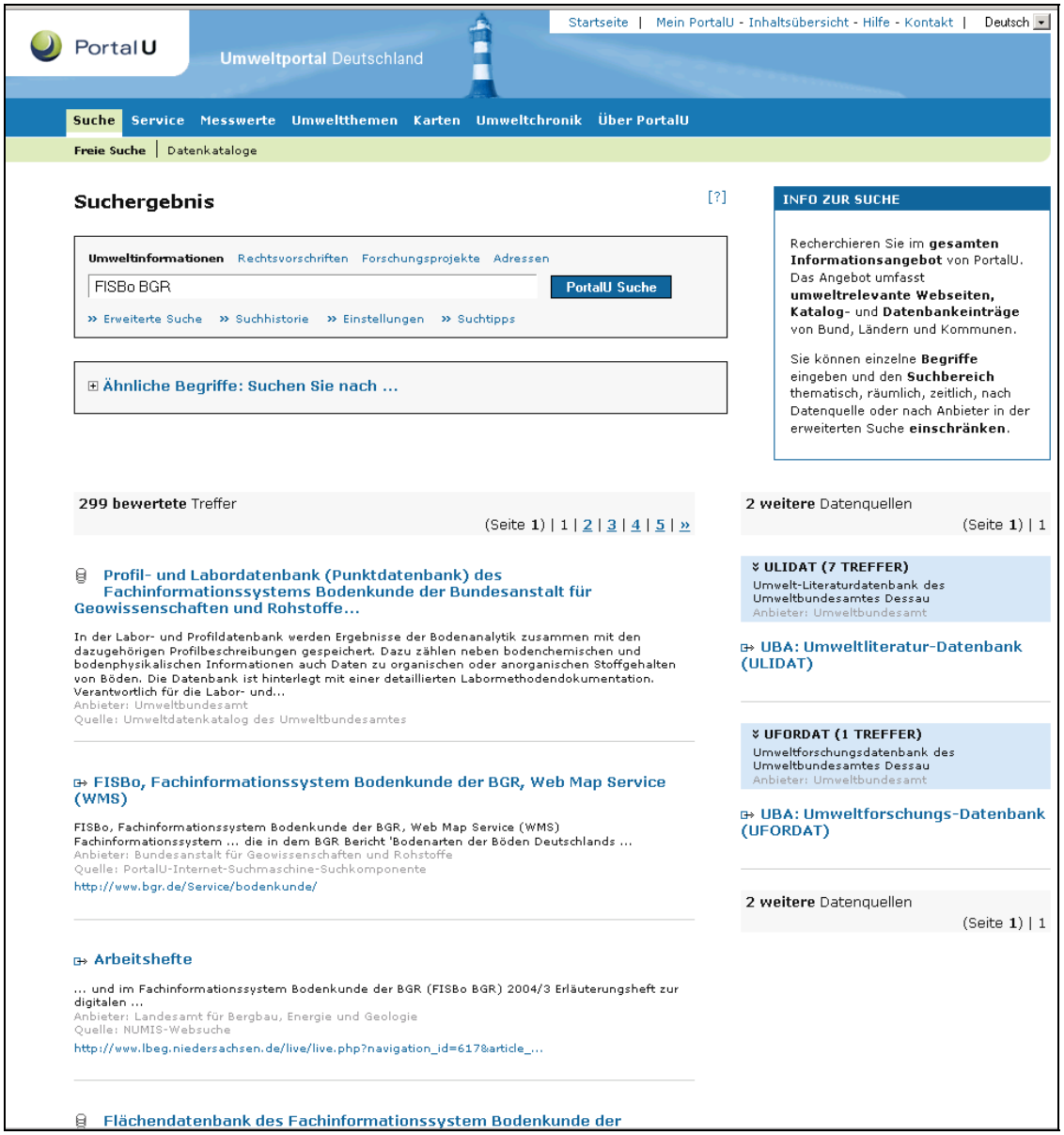


Abb. 4.7: PortalU erntet von unterschiedlichen Suchdiensten (s. „Quelle:…“; online-Ressource: http://www.portalU.de, letzter Abruf, 22.02.2011)

Relevanz für BOKLIM

Die Bereitstellung von **Messdaten**, die für BOKLIM im Vordergrund stehen, ist derzeit noch nicht absehbar. Es liegt zwar mit dem InGrid 2.2 ein Konzept für die Bereitstellung von Sensor- und Messdaten vor, der Zeitpunkt der Realisierung ist jedoch aufgrund einer noch erforderlichen Prioritätensetzung und Finanzierungsfragen noch offen.

Im Bereich der Metadaten ist es prinzipiell möglich, Datensammlungen recherchierbar zu dokumentieren. Eine parameterspezifische Dokumentation ist allerdings nur bedingt möglich. Dies liegt daran, dass der zugrundeliegende Metadatenkatalog des Portal U hier nicht den gewünschten Detaillierungs- und Spezifizierungsgrad aufweist. Konkret folgt daraus, dass Parameter zwar als Freitext verzeichnet werden können, entsprechende Auswahllisten für eine einheitliche Kodierung jedoch fehlen. Zudem können parameterspezifische Eigenschaften lediglich als Freitext-„Erläuterungen“ dokumentiert werden. Für eine abfragefähige Dokumentation von Parametern ist es erforderlich, aufgrund der fachlichen Anforderungen Auswahllisten zu erstellen und Möglichkeiten für die Angabe parameterspezifischer Eigenschaften zu schaffen. Wird dies im Bereich der Metadaten vorgesehen, ergibt sich der Vorteil, dass die Datennutzer vorhandene Messdaten für bestimmte Parameter aus verschiedenen Datenquellen identifizieren können, ohne dass die Daten selbst zur Verfügung stehen müssen.

Den BOKLIM Partnern wurde von der Koordinierungsstelle Portal U im Rahmen von Abstimmungsgesprächen dankenswerterweise eine Testzugang zu einer aktuellen InGridEditor-Instanz zur Verfügung gestellt, die eine Analyse der aktuellen Funktionen ermöglicht hat. Aus der eingehenden Betrachtung der Möglichkeiten der Metadatenerfassung mit dem InGrid-Editor ergeben sich folgende Hinweise:

- Die im vorgeschlagenen Metadatenprofil enthaltenen Metadatenelemente lassen sich aktuell weitgehend mit Portal U dokumentieren (s. Anl. 4). Allerdings stehen für Geoinformationen und Datensammlungen unterschiedliche Metadatenelemente, z.B. unter der Rubrik Fachbezug zur Verfügung:
- Bei Datensammlungen/Datenbanken fehlen bisher notwendige Informationen zur räumlichen Datenstruktur (z.B. Typ der Raumobjekte = Punktdaten) sowie zur Konformität zu fachlichen Spezifikationen (z.B. einer künftigen INSPIRE Spezifikation Boden, Annex III).
- Bei Geoinformationen wiederum ist es derzeit unter Fachbezug noch nicht möglich Parameterlisten zu dokumentieren.
- Für beide Objektarten (Geoinformation und Datensammlungen ist eine weitergehende strukturierte sowie kodierte Beschreibung von parameterspezifischen Eigenschaften (z.B. Analysemethode, Untersuchungsmedium etc. noch nicht möglich (s. Abb. 4.10).

Es liegt jedoch bereits ein Konzept vor, welches die Anforderungen aus den Durchführungsbestimmungen zu Datenspezifikationen von INSPIRE flexibler handhaben wird. Es wird dann möglich sein, Felder und Untertabellen frei zu definieren und mit Auswahllisten zu hinterlegen (Koordinierungsstelle Portal U 2010, Fachliches Feinkonzept InGrid 2.3). Es wird derzeit davon ausgegangen, dass es dann möglich sein wird eine Spezifikation für Bodendaten zu hinterlegen, die entsprechende Strukturen und Codelisten enthält. Darüber hinaus kann künftig ein Profil angelegt werden, das frei definierte Felder für spezielle Anforderungen zusammenfasst. Ein solches Profil könnte zum Thema Bodendaten erstellt werden, um die aktuell noch bestehenden weitergehenden Anforderungen zu erfüllen. Da pro Katalog nur ein Profil zugewiesen werden kann, wäre ggf. ein eigener Katalog für das Thema Bodendaten erforderlich.

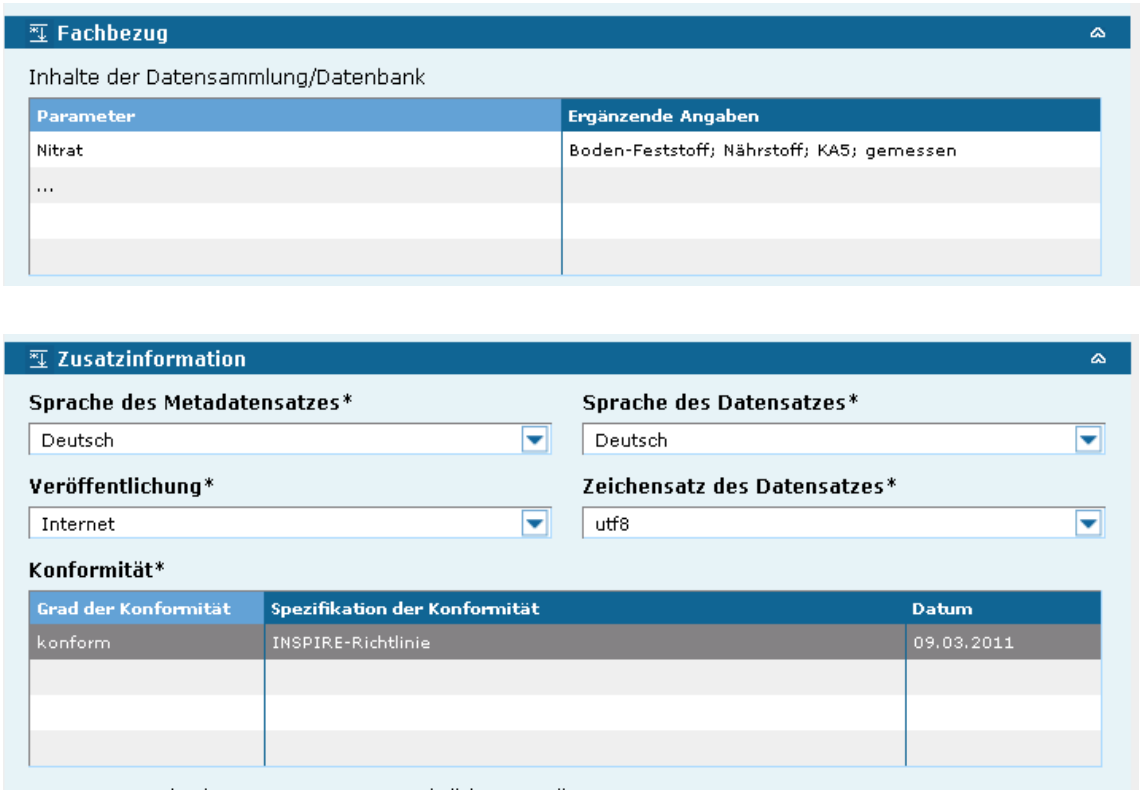


Abb. 4.8: Beispieldarstellungen aus dem InGrid-Editor (Parameter bei Datensammlungen; Konformität bei Geoinformationen)

Fazit für die Nutzung von PortalU:

PortalU kommt trotz der dargestellten Probleme als initiales Werkzeug für die Bereitstellung von Metadaten für BOKLIM-relevante Messdaten in Betracht. Denkbar ist beispielsweise, dass einheitliche Dokumentationsrichtlinien für BOKLIM-relevante Daten erstellt werden, die dazu führen, dass entsprechende Daten bis zu einem gewissen Detaillierungsgrad gut recherchierbar dokumentiert werden.

Portal U ist aus mehreren Gründen gut geeignet:

- PortalU ist INSPIRE und ISO 19115/19119 konform.
- PortalU-Katalogdaten können als Dienst in andere INSPIRE- und ISO-konforme Katalogdienste oder Portale eingebunden werden.
- PortalU ist das fachlich nächste Zielportal für Bodendaten, die im Kontext des Umweltschutzes eingesetzt werden sollen.
- PortalU wird im eContentplus-Projekt GS SOIL eingesetzt, in dem derzeit intensiv an bodenfachlichen Metadatenprofilen und Applikationsschemata gearbeitet wird.
- Mit der Koordinierungsstelle von PortalU wurden bereits Gespräche geführt, wie klimarelevante Bodendaten unabhängig vom Ressort eingepflegt und damit verfügbar gemacht werden können.

4.5.4 GS Soil

Das eContentplus Projekt GS Soil ist eine Beispielimplementierung für ein europaweites Fachportal für Bodenkarten und Bodendaten. Bisher wurde schwerpunktmäßig der Bereich Bodenkarten bearbeitet. Außerdem wird von GS Soil ein Datenportal entwickelt, das aktuell Bodenkarten und entsprechende Metadaten bereitstellt. Das GS Soil Portal beruht auf der PortalU-Software und OGC-Katalogdienst-Technologie und ermöglicht somit ebenfalls das „Ernten“ („Harvesting“) von dafür vorgesehenen PortalU-Metadaten-einträgen.

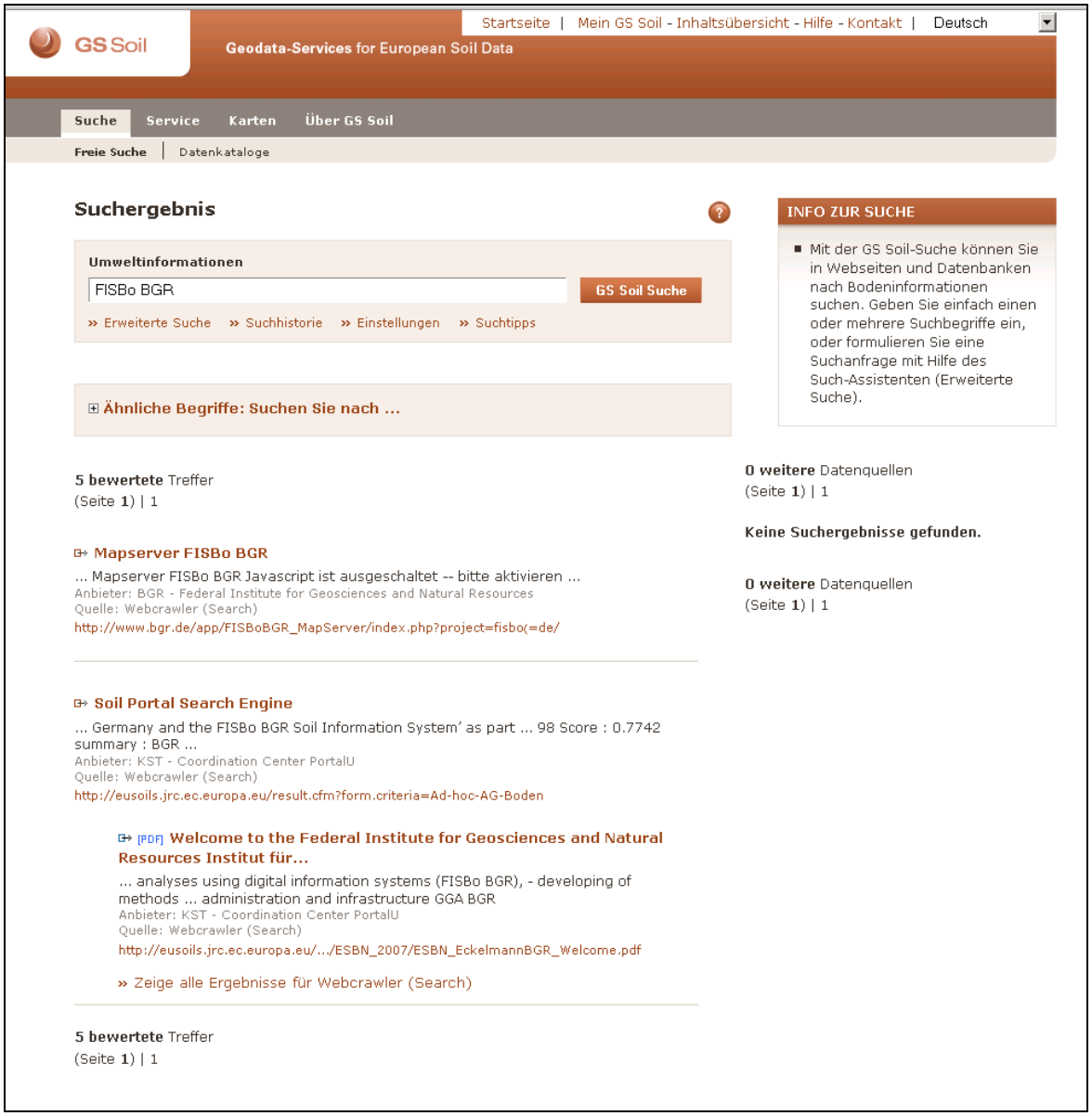


Abb. 4.9: GS Soil Suchdienst findet PortalU Metadateneinträge (online-Ressource: http://gssoil-portal.eu/ingrid-portal, letzter Abruf, 22.02.2011)

Im Rahmen des Projekts werden Datenspezifikationen in operationaler Form entwickelt, an zentraler Stelle eingebunden in einen Rückkopplungsprozess zwischen ISO 28258 und der INSPIRE Thematic Working Group Soil. Diese Datenspezifikationen werden getestet; interoperable Beispieldaten (Karten, bodenkundliche Profilbeschreibungen, Messdaten einschl. Monitoring) als WMS/WFS bereitgestellt, sowie entsprechende Metadaten entwickelt und ebenfalls bereitgestellt. Damit wird das gesamte IN-

SPIRE Portfolio für Boden spezifiziert und getestet. Mit dem GS Soil Portal steht darüber hinaus eine Schnittstelle für den Datenaustausch mit Nutzern zur Verfügung.

Die Einbindung von Downloaddiensten in Form von Web Feature Services ist ebenfalls in Entwicklung. Damit steht künftig eine Möglichkeit Geodaten über das Portal herunterzuladen, sofern man dazu autorisiert ist. Die Geodaten können anschließend in GIS Systemen weiter analysiert und nach eigenen Vorstellungen individuell dargestellt werden.

Aktuell wird im Rahmen von GS Soil – und dies ist für BOKLIM besonders wertvoll – an einem sinnvollen Metadatenprofil für Bodendaten sowie an einem bodenkundlichen Applikationsschema (Struktur und Kodierung) zum Austausch Bodendaten (s. Kap. 4.3.3) gearbeitet. Die ersten Entwürfe dazu sind informell bereits in die hier vorgeschlagenen Empfehlungen (s. z.B. Metadatenprofil, Kap. 4.4.2) eingeflossen. Die ersten offiziellen Ergebnisse werden für Sommer 2011 erwartet.

Fazit für GS Soil:

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass der Schwerpunkt in GS Soil deutlich auf Such- und Darstellungsdiensten liegt. Downloaddienste im Sinne von INSPIRE (Web Feature Services) werden prototypisch behandelt, um die Verfahrensweise von INSPIRE aufzuzeigen.

4.6 Zukunftsszenario

In diesem Kapitel wird ein Blick in die Zukunft gewagt. Das Zukunftsszenario besteht darin, dass von den Datenbesitzern freigegebene Bodenmessdaten für Nutzer der Klimaforschung, der Klimafolgenforschung und –anpassung, z.B. für statistische Auswertungen oder als Modelleingangsdaten, zur Verfügung stehen. Sie können ohne aufwändige Recherchen gefunden und hinsichtlich ihrer Qualität, Repräsentativität und Vergleichbarkeit beurteilt werden, sind interoperabel und im Internet abrufbar und können ohne aufwändige Aufbereitungsarbeiten weiterverarbeitet werden. Daneben stehen Boden-Flächendaten zum Bodenzustand und Landnutzung zur Verfügung, die für räumliche Betrachtungen verwendet werden können. So leisten die Ergebnisse des Bodenmonitoring und der Bodenzustandserhebung einen wichtigen Beitrag zur Beant-

wortung sowohl regionaler als auch überregionaler Fragestellungen. Im Folgenden wird betrachtet, welche Komponenten und Strukturen erforderlich sind, um das Zukunftsszenario zu erreichen. Damit wird eine Zielrichtung aufgezeigt, an der sich ein an der Realität orientiertes Umsetzungskonzept (s. Kap. 4.7) ausrichten kann.

Mit der INSPIRE-Richtlinie zeichnet sich ein rechtlicher und organisatorischer Rahmen ab, der die Zukunft der Metadaten und Dateninfrastrukturen prägt. Diese Zukunft ist gekennzeichnet durch:

- einheitliche technische Standards und Schnittstellen,
- einheitliche Nomenklatur und Semantik,
- europaweit verfügbare Bodendaten und
- durchgängige Datenprozessierungsketten.

Im Schlepptau von INSPIRE entstehen aktuell INSPIRE-konforme Portale und Fachschemata, die sich auch für klimarelevante Bodendaten eignen. Es wird erwartet, dass die aktuellen Entwicklungen dazu führen, dass entsprechende Infrastrukturen und Fachdaten-Spezifikationen in 3 Jahren deutlich ausgebaut sein werden.

Ein Zukunftsszenario sieht verkürzt so aus: Ein Datenbesitzer stellt seine Datenressourcen standardkonform über Web-Dienste zur Verfügung. Über Metadaten publiziert er Inhalt und alle erforderlichen Charakteristika für potenzielle Nutzer. Den potenziellen Nutzern stehen über diverse Metadatenportale und die darin eingebundenen Katalogdienste Recherchemöglichkeiten zur Verfügung, die den Weg vom Datenbedürfnis zum Datenzugriff erheblich verkürzen.

Unabhängig von den Aktivitäten, die im Nachgang des BOKLIM-Vorhabens ausgelöst werden, werden sich die zur Verfügung stehenden Metadatenportale, Fachschemata und Datenportale weiterentwickeln. Die zu erwartenden Entwicklungen werden nachfolgend dargestellt. Sie bilden die Basis für ein Umsetzungskonzept zur Verbesserung der Datenverfügbarkeit von klimarelevanten Bodendaten in Deutschland.

Metadatenportal PortalU

Mit PortalU steht derzeit bereits ein Instrument zur Erfassung und Recherche von Umweltdaten zur Verfügung. Das System beruht auf aktuellen Standards zur Metadatenverwaltung, ist INSPIRE-konform und die erfassten Metadaten lassen sich in anderen Portalen einbinden. Unabhängig davon, welches Portal in 3 oder 5 Jahren das geeignete sein wird, garantiert die INSPIRE-Konformität, dass heute mit PortalU erfasste Metadaten auch künftig weiter verfügbar sein werden. Die Planungen, auch die technischen Spezifikationen, die in den thematischen Arbeitsgruppen zu INSPIRE derzeit entstehen zu unterstützen, sind positive Signale hin zu interoperablen Metadaten für Bodendaten.

Datenportal für Messdaten

Im Kontext von GDI-DE und INSPIRE werden (Geo-) Dateninfrastrukturen entstehen, die auch bodenkundliche Messdaten erschließen. Es wird möglich sein alle relevanten Datenquellen über die zentral bekannten Adressen zu recherchieren und sich über die Metainformationen einen Überblick verschaffen zu können. Die Datendienste selbst werden vermutlich verteilt vorliegen. Das bedeutet, dass gut ausgestattete Institutionen selbst Infrastrukturen aufbauen werden, die die entsprechenden Informationen als Dienste (z.B. Web Feature Services oder Sensor Observation Services) bereitstellen werden. Unter Umständen werden diese Dienste auch in dezentrale Portale eingebettet sein, die über spezifische Abfrageformulare verfügen und somit stärker auf die fachlichen Bedürfnisse zugeschnitten sind, als die zentralen Geoportale zur Umsetzung von INSPIRE.

Fachschemata Bodendaten und Umweltmonitoring

Über INSPIRE wurden in den letzten Jahren Entwicklungsprojekte angeregt, die zu einer europaweiten Spezifikation von Fachschemata führen werden. Es ist zu erwarten, das diese Entwicklungen einen großen Schritt für die Vereinheitlichung bereitgestellter Daten zur Folge haben wird. Dieser Prozess wird sich umso schneller vollziehen, je eher sich die zentralen Akteure der Fachdomäne Boden auf gemeinsame Fachstandards verständigen.

Der Prozess von den heute vorherrschenden herstellerspezifischen Systemen zu interoperablen Datendiensten wird sich jedoch in einigen Etappen vollziehen. Es ist derzeit noch unklar, inwiefern die Datenbesitzer mit ihren Datendiensten direkt die erarbeiteten Fachmodelle bedienen werden. Denkbar ist, dass die Dienste an zentraler Fachstelle zusammengeführt und vereinheitlicht werden. Hier gibt WasserBLIcK (**B**und-**L**änder-**I**nformations- und **K**ommunikationsplattform - www.wasserblick.net) als Beispiel aus dem Gewässerschutzbereich erste Hinweise, wie Daten aus den Bundesländern zusammengeführt und der EU als Dienst bereitgestellt werden können.

Abbildung 4.10 zeigt den schematischen Aufbau einer solchen künftigen Dateninfrastruktur für Bodendaten.

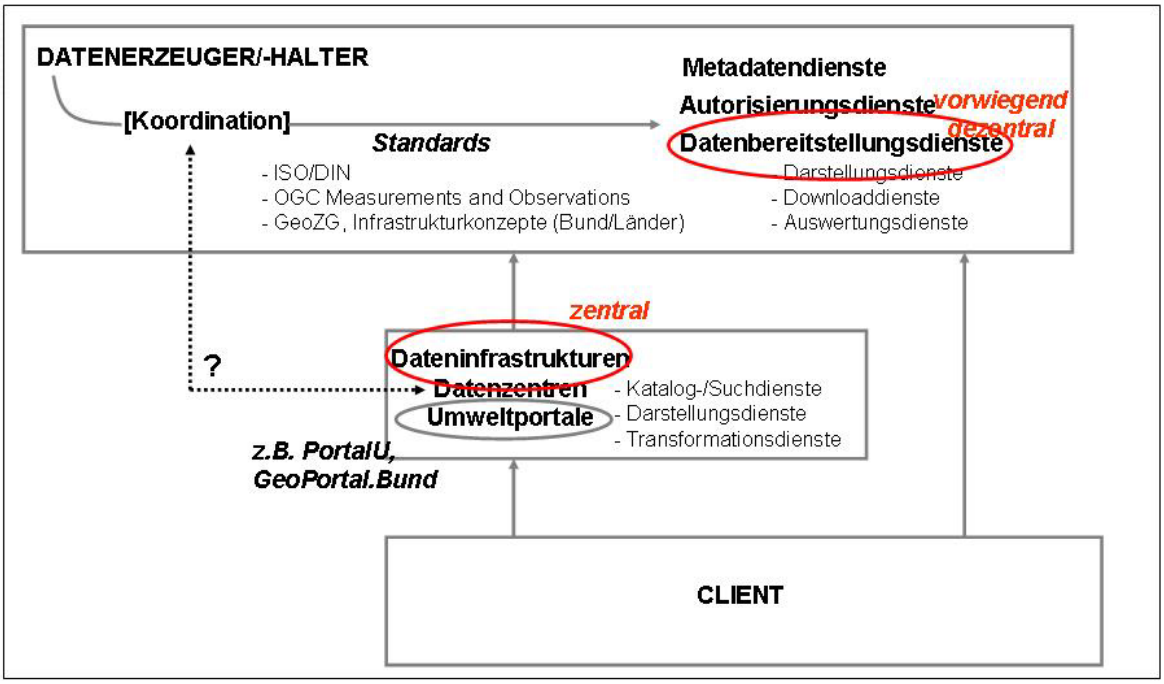


Abb. 4.10: Konzept für die zukünftige Datenbereitstellung

Tabelle 4.8 fasst die anstehenden Aufgaben auf dem Weg zur „Datenvernetzung der Zukunft“ zusammen. Die Aufgaben für die Umsetzung können nur in mehreren Arbeitsschritten bewältigt werden. In erster Priorität geht es um die geregelte Erfassung und Bereitstellung von Metadaten. In zweiter Linie geht es dann um das Einbinden anderer

Datensammlungen sowie um das Anbinden der tatsächlichen Messdaten (in den verfügbaren Formaten). Erst in dritter Priorität sollte man dann die Standardisierung der Messdaten und der entsprechenden Datendienste anstreben. Diese Reihenfolge ergibt sich aus den noch andauernden Standardisierungstätigkeiten im Kontext von ISO und INSPIRE. Das Umsetzungskonzept mit konkreten Handlungsempfehlungen für die jeweils betroffenen Akteure ist in Kapitel 6.2 dargelegt.

Tab. 4.8: Anstehende Aufgaben auf dem Weg zur „Datenvernetzung der Zukunft“

Aufgabe	**Akteure**	**Priorität/ Reihenfolge**
Bereich Metadaten:		
▪ Standards für die Metadatenbereitstellung/ Metadatenkatalog ▪ Fachliches Metadatenprofil für Bodendaten (Schwerpunkt Bodenmessdaten von BOKLIM)	Zuständige Bundesbehörden (gemäß nationaler und internat. Vorgaben)	1
▪ Metadaten zu den Datenbeständen	Datenprovider	1
▪ Geeignetes Metadatenportal zur Erfassung und Recherche	Service-/ Portaldienstleister, Zuständige Bundesbehörden	1
▪ Möglichkeit, andere standardkonforme Metadatenkataloge einzubinden („Ernten“)	Service-/ Portaldienstleister	2
Bereich Messdaten		
▪ Datendienste und Portale, die Bodenmessdaten bereitstellen (ggf. unstandardisiert)	Service-/ Portaldienstleister	2
▪ Datendienste mit <u>standardisierten</u> Kommunikationsschnittstellen	Service-/ Portaldienstleister	3
▪ Semantisches Fachschema für Bodenmessdaten	Zuständige Bundesbehörden (gemäß nationaler und internat. Vorgaben)	3
▪ Datenportale, die <u>standardisierte</u> Datendienste bereitstellen	Service-/ Portaldienstleister	3

5 INFORMATION UND KOMMUNIKATION

C. Kaufmann-Boll; S. Lazar; G. Meiners

An der Gewinnung und der Nutzung von Bodendaten ist eine Vielzahl von Institutionen und Akteure beteiligt (siehe Abb. 5.1). Einerseits erheben, pflegen und nutzen die Verwaltungsbehörden die Daten; andererseits nutzen Universitäten und Forschungseinrichtungen die behördlichen Daten, betreiben aber z.B. auch landwirtschaftliche Dauerfeldversuche.

Abb. 5.1: Akteure Datengewinnung und -nutzung

Information und Kommunikation findet im Hinblick auf die im Vorhaben betrachteten Mess- und Erhebungsaktivitäten bislang fast ausschließlich unter Beteiligung von Akteuren einzelner Messprogramme statt. Messnetz-, ressort- und themenübergreifenden Netzwerke bestehen nicht. Informations- und Kommunikationsprozesse laufen vor allem über behördliche Arbeits- und Entscheidungsgremien, wie z.B. Bund-/Länderarbeitsgruppen, und im Rahmen von wissenschaftlich ausgerichteten Veranstaltungen ab. Z.B. sind nur im Bereich von forstlichem Monitoring und Erhebungen

ständige Arbeitsgruppen eingerichtet. Die Beantwortung von Fragen zu Klimafolgen und Klimaanpassung erfordert zunehmend den interdisziplinären Austausch von Informationen.

Die intensive Informations- und Kommunikationsarbeit im BOKLIM-Vorhaben leistete einen Beitrag zum Wissenstransfer für die Zielgruppen der Datenbereitsteller, der Datennutzer und der Entscheidungsträger einerseits und das Kennenlernen der Vorstellungen der Zielgruppen andererseits. Die datenführenden Institutionen wurden als Anlaufstellen für Bodendaten besser bekannt und es wurde ein Feedback zu den Bewertungen und Empfehlungen für den Dateneinsatz und die Datenbereitstellung eingeholt.

Die auf der Projekthomepage www.boklim.de (siehe Abb. 5.2) bereitgestellten Informationen – wie z.B. eine strukturierte Link-Liste zu folgenden Themen – können künftig an das Internetangebot des UBA gekoppelt werden um den Zugang zu Daten aus Bodenmonitoring und Bodenzustandserhebung in einem ersten Schritt zu verbessern (siehe Kap. 6.3):

- Klimawandel, Klimafolgen, Anpassung
- Forstliches Monitoring und Inventuren
- Boden-Dauerbeobachtungsflächen (BDF)
- Landwirtschaftliche Dauerfeldversuche
- Lysimeterstationen
- Bodenkarten, Bodenschätzung
- Info-Systeme, Datenportale
- Forschungsvorhaben
- EU – Bodenrahmenrichtlinie

Ein neben Projektnews und Flyern erarbeitetes Poster ist in Anlage 6.2 dargestellt. Zu dem im Vorhaben durchgeführten UBA-Workshop „Anwendung von Bodendaten bei der Klimaanpassung“ am 29./30. 9.2009 gehörten Fachvorträge zu den Themenkomplexen Anpassungsstrategie, Bodenmonitoring, Bodenzustandserhebung, Datenbedarf, -angebot und -bereitstellung sowie EU-weite und rechtliche Aspekte der Erhebung

von Bodendaten. In Diskussionsforen wurden Zwischenergebnisse aus dem Vorhaben erörtert und weiterentwickelt. Die workshopbegleitende Ausstellung „Marktplatz für Bodendaten“ diente zum Informationsaustausch und zur Vernetzung von Akteuren der Datenerhebung und Datennutzung. Die Beiträge und Ergebnisse Workshops sind in UMWELTBUNDESAMT (2010) veröffentlicht.

Abb. 5.2: Projekthomepage

Durch die Präsentation von BOKLIM auf diversen Veranstaltungen wurde eine Vernetzung der Zielgruppen erreicht (z.B. ELSA-Jahrestagung in Wuppertal, BDF-Workshop in Karlsruhe, BDF-Kolloquium in Dresden, Klimaschutz-Workshop des vTI in Braunschweig, Gründungsveranstaltung des Climate Service Centers in Geesthacht, Klimzug-Auftaktveranstaltung in Köln, KomPass-Workshop in Dessau, DV-Workshop von UBA/BGR in Dessau, KBU-Veranstaltung am Tag des Bodens 2010). Der Beitrag für ein KOMPASS-Themenblatt hat die Arbeiten des Umweltbundesamtes an der Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel (DAS) unterstützt.

Insgesamt zeigte sich ein großer Bedarf für mehr Information und Absprache zwischen Datenerhebern und Datenhaltern mit den Datennutzern auf Seiten der Klimafolgen- und -anpassungsforschung. Um das Potenzial der Bodendaten für die Klimaforschung effizient zu nutzen ist es von großer Bedeutung, die durch das BOKLIM-Vorhaben anregte Kommunikation zwischen den Beteiligten auch künftig zu erhalten und zu fördern. Konkrete Maßnahmen hierzu werden in Kapitel 6.3 vorgeschlagen.

6 EMPFEHLUNGEN FÜR BODENMONITORING UND BODENZUSTANDS-ERHEBUNG ZUM EINSATZ IN DER KLIMAFOLGEN- UND -ANPASSUNGSFORSCHUNG

ARGE BOKLIM

In Zukunft wird weiterhin und vermehrt ein Bedarf an Bodendaten bestehen, um Fragen zu den Klimafolgen und zur Klimaanpassung zu beantworten. Auch um die Wirkung und den Erfolg von Bodenschutz- und Klimaschutzmaßnahmen sowie Rückkopplungseffekte von im Boden ablaufenden Prozessen auf das Klima zu bewerten, sind Bodendaten erforderlich (vgl. Kap. 3). Aktueller Anlass für Überlegungen zur Weiterentwicklung der bestehenden Programme des Bodenmonitoring und der Bodenzustandserhebung sind die Aktivitäten zur Umsetzung der Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel (DAS) und des Aktionsplans Anpassung.

Handlungsbedarf besteht bei der Anpassung der Programme des Bodenmonitoring und der Bodenzustandserhebung (s. Kap. 6.1), der Bereitstellung von Bodendaten für eine effiziente Nutzung (Technik und Organisation) (s. Kap. 6.2) sowie bei Informationsaustausch und Kommunikation mit beteiligten Akteuren, Öffentlichkeit, Politik und Wissenschaft (s. Kap. 6.3).

6.1 Anpassung der Programme

ARGE BOKLIM

Im Fokus des vorliegenden Berichts steht die Frage, inwieweit sich die in Deutschland vorhandenen Programme des Bodenmonitoring und der Bodenzustandserhebung eignen, um zu beurteilen, ob und wie sich Klimaänderungen auf den Zustand der Böden auswirken. Die Strategie zur Beantwortung dieser Frage umfasst drei Säulen, die sowohl auf Daten aus Bodenmonitoring, Bodenzustandserhebung und weiteren z.B. agrarmeteorologischen Messaktivitäten als auch auf Bodenkarten aufbauen (siehe Abb. 6.1). In Kapitel 3.2.1 werden die bodenbezogenen Messprogramme und -aktivitäten den drei Säulen zugeordnet.

Abb. 6.1: Aufgaben zur Beurteilung der Wirkung von Klimaänderungen auf Böden

Unserer Auffassung nach sollte das Ziel von Politik und Forschung sein, die erforderlichen Bodendaten langfristig und kontinuierlich zu erheben, um die Fragen zur Veränderung der Böden unter veränderten Klimabedingungen anhand belastbarer Daten zu beantworten. Hier gilt es, auf die bestehenden Programme und Aktivitäten aufzubauen und bestehende organisatorische und technische Strukturen zu nutzen. Der in der Eigenverantwortlichkeit von Ländern und Forschungseinrichtungen liegende Betrieb von Messnetzen sollte verstärkt in den Dienst der in Bund und Ländern gleichermaßen relevanten Aufgaben der Klimaanpassung gestellt werden. Ziel ist eine intelligente und kosteneffiziente Nutzung der etablierten und bewährten bestehenden Messsysteme. Diese Aufgaben können nur durch eine langfristige länder- und ressortübergreifende Kooperation und eine zielgerichtete Koordination bewältigt werden.

Zur Weiterentwicklung der Programme des Bodenmonitoring und der Bodenzustandserhebung für Böden werden im Folgenden messnetz- und fragestellungsübergreifende Handlungsempfehlungen abgeleitet. Diese sollten in einem nächsten Schritt durch die zuständigen Behörden priorisiert und konkretisiert werden. Ohne eine Umsetzung dieser Schritte ist nicht sichergestellt, dass künftig die erforderlichen belastbaren und auswertbaren Daten für die Fragen von Klimawandel und Anpassung zur Verfügung stehen. Nur durch eine Integration der Messnetze BDF, ICP Level I / BZE Wald, ICP Level II, BZE Landwirtschaft und Landwirtschaftliche Dauerfeldversuche in die zu bearbeiteten Fachthemen und durch die Vernetzung thematisch einschlägiger wie klima-,

boden- und bewirtschaftungsrelevanter langfristiger Prozessstudien (universitäre und außeruniversitäre Forschungseinrichtungen) können die Anforderungen der Klimafolgenforschung im Bereich der Wirkungs- und Prozesskontrolle erfüllt werden.

Themenübergreifende Handlungsempfehlungen

Um die Anforderungen für eine effiziente Nutzung von Bodendaten aus Erhebung und Monitoring (siehe Kap. 3.1.5) zu erfüllen und die Datendefizite (siehe Kap. 3.2.6) zu reduzieren, empfiehlt die ARGE BOKLIM folgende Maßnahmen und Aktivitäten:

- **Auswahl relevanter Fragestellungen** für die Klimafolgenforschung (siehe Tab. 3.7) und Zuordnung des erforderlichen Parameterspektrums, Benennung koordinierender Institutionen für die relevanten Fragestellungen; systematische Koordination von einschlägigen Forschungsprogrammen der DFG, des Bundes und der Länder. Bisher fehlen bundesweite räumliche Abschätzungen der Wirkungen von Klimaänderungen auf den Abbau organischer Substanz, den Bodenwasserhaushalt, die biologische Aktivität und die Zusammensetzung der Bodenlebensgemeinschaft, die Freisetzung klimarelevanter Gase und die Schadstoffmobilität, sowie für die Langzeitbeobachtungen von erosionsbedingten Bodenabträgen. Vor diesem Hintergrund wird für diese Fragestellungen eine bundesweite Erhebung und Beobachtung mit hinreichender Intensität empfohlen. Mindestanforderungen an den Parameterumfang sind für verschiedene Fragestellungen in Tabelle 3.6 angegeben.

→ verantwortliche Akteure: Bund (Koordination), Umwelt-, Forst-, Landwirtschaftsbehörden der Bundesländer, Ressortforschungseinrichtungen, Netzwerk Bodenwissenschaften bei acatech (Deutsche Akademie der Technikwissenschaften)

- **Durchführung von themenspezifischen Repräsentanzanalysen für alle Messstandorte** der Basis-BDF, Intensiv-BDF, ICP Level II-Standorte und Landwirtschaftliche Dauerfeldversuche sowie Auswahl von themenspezifischen Messstandorten für 1) Überwachung 2) Prozessstudien 3) Modellszenarien (Modelleingangsdaten).

  Um zu prüfen, ob mit den vorhandenen Daten bereits repräsentative flächenhafte Aussagen für das Bundesgebiet getroffen werden können, sollte eine Zuordnung der verschiedenen Flächen zu fragestellungsspezifisch relevanten Räumen erfolgen. Es ist zu prüfen, ob diese Räume in ausreichender Zahl mit repräsentativen

Daten zu den zu untersuchenden Parametern abgedeckt werden. Ziel ist es dabei, für die relevanten Fragestellungen die realen Varianten und Kombinationen von Nutzung und Standortfaktoren in ausreichender Anzahl abzubilden. Auch extensiv oder nicht genutzte Standorte und Extremstandorte (Trocken/Nass, organische Böden etc.) sollten berücksichtigt werden. Es sollten Gebiete identifiziert und vereinbart werden, die von klimabedingten Veränderungen (potenziell) besonders betroffen sind (so genannte Empfindlichkeitscluster, z.B. Moore für Humus/C). Identifiziert werden können diese Gebiete themenspezifisch aufgrund vorhandener Bodeninformationen, Kartenwerke und dem Stand des Wissens über Regionen erhöhter Anfälligkeit. Jede Region sollte mit einer ausreichenden Anzahl von Intensiv-BDF-Standorten und Level II-Standorten, landwirtschaftlichen Dauerfeldversuchen abgedeckt sein.

→ verantwortliche Akteure: Bund (Koordination z.B. BGR, UBA, vTI), Umwelt-, Forst-, Landwirtschaftsbehörden der Bundesländer

- **Kontinuierliche und langfristige Fortführung von Messungen** für die vorangehend identifizierten Standorte und Parameter innerhalb der bestehenden dauerhaft eingerichteten Messprogramme der Basis- und Intensiv-BDF, Landwirtschaftliche Dauerfeldversuche, ICP Level II zu Überwachungszwecken und um statistisch auswertbare Zeitreihen zu erhalten; besonders wichtig ist die Fortführung bodenzoologischer und mikrobiologischer Untersuchungen auf BDF, da diese ausschließlich hier in geeigneter Form gemessen werden.

→ verantwortliche Akteure: Umwelt-, Forst-, Landwirtschaftsbehörden der Bundesländer, Ressortforschungseinrichtungen des Bundes, Universitäten

- **Regelmäßige Wiederholung von rasterbasierten Inventuren** zur Erhebung des Bodenzustands mit dem vorrangigen Ziel der regelmäßigen, stichproben- und flächenhaften Ermittlung des Bodenzustands (ICP Level I / BZE Wald und Landwirtschaft).

→ verantwortliche Akteure: Forst- und Landwirtschaftsbehörden des Bundes und der Bundesländer

- **Rechtliche Verankerung von Überwachung und Prozessforschung, Datenaustausch und übergreifender Koordination für langfristig angelegte Programme**, sofern bisher nicht vorhanden. Möglichkeiten zur Verankerung in Bundes- und Län-

dergesetzen sowie zum Datenaustausch z.B. in Anlehnung an die Verwaltungsvereinbarung zwischen Bund und Ländern über den Datenaustausch im Umweltbereich (VwV Datenaustausch, Anhang II.4 „Austausch bodenschutzrelevanter Daten“) sollten geprüft werden (z.B. in Anlehnung an das Protokoll „Bodenschutz“ der Alpenkonvention von 1991, siehe nachfolgender Kasten).

→ verantwortliche Akteure: Bund, Länder

- **Unterstützung einer langfristigen Kontinuität der Programme** durch Fördermaßnahmen

→ verantwortliche Akteure: Umwelt-, Forst-, Landwirtschaftsbehörden des Bundes und der Bundesländer, Netzwerk Bodenwissenschaften bei acatech (Deutsche Akademie der Technikwissenschaften)

Protokoll zur Durchführung der Alpenkonvention von 1991 im Bereich Bodenschutz (Auszug)
(Quelle: www.alpconv.org)

Artikel 19 - Forschung und Beobachtung

(1) Die Vertragsparteien fördern und harmonisieren in enger Zusammenarbeit Forschungen und systematische Beobachtungen, die zur Erreichung der Ziele dieses Protokolls dienlich sind.

(2) Die Vertragsparteien sorgen dafür, dass die jeweiligen Ergebnisse nationaler Forschung und systematischer Beobachtung in ein gemeinsames System zur dauernden Beobachtung und Information einfließen und im Rahmen der geltenden staatlichen Ordnung öffentlich zugänglich gemacht werden.

(3) Die Vertragsparteien vereinbaren, ihre alpenbezogenen Forschungsvorhaben zum Bodenschutz unter Berücksichtigung anderer nationaler und internationaler Forschungsentwicklungen zu koordinieren, und nehmen gemeinsame Forschungsaktivitäten in Aussicht.

(4) Besondere Aufmerksamkeit ist den Bewertungen der Bodenempfindlichkeit im Hinblick auf unterschiedliche menschliche Tätigkeiten, den Bewertungen der Regenerationsfähigkeit der Böden sowie der Prüfung der bestgeeigneten entsprechenden Technologien beizumessen.

Artikel 20 - Erstellung harmonisierter Datengrundlagen

(1) Die Vertragsparteien kommen überein, im Rahmen des Beobachtungs- und Informationssystems der Alpen vergleichbare Datengrundlagen (Bodenparameter, Probenahme, Analytik, Auswertung) und die Möglichkeit des Datenaustauschs zu schaffen.

(2) Die Vertragsparteien verständigen sich über vorrangig zu untersuchende bodengefährdende Stoffe und streben vergleichbare Bewertungsmaßstäbe an.

(3) Die Vertragsparteien streben an, den Zustand der Böden im Alpenraum unter Berücksichtigung der geologischen und hydrogeologischen Situation nach gleichen Bewertungsgrundlagen und harmonisierten Methoden repräsentativ zu erfassen.

Artikel 21 - Einrichtung von Dauerbeobachtungsflächen und Koordinierung der Umweltbeobachtung

(1) Die Vertragsparteien verpflichten sich, für den Alpenraum Dauerbeobachtungsflächen (Monitoring) einzurichten und in ein alpenweites Netz zur Bodenbeobachtung zu integrieren.

(2) Die Vertragsparteien vereinbaren, ihre nationale Bodenbeobachtung mit den Umweltbeobachtungseinrichtungen in den Bereichen Luft, Wasser, Flora und Fauna zu koordinieren.

(3) Im Rahmen dieser Untersuchungen werden die Vertragsparteien nach vergleichbaren Vorgaben Bodenprobenbanken aufbauen.

- **Verstärkte Aktivitäten zur Vernetzung der Messprogramme untereinander zur Steigerung der Effizienz:**
  - Einbindung vorhandener Messstandorte der Boden-Dauerbeobachtung und der landwirtschaftlichen Dauerfeldversuche in die Bodenzustandserhebung Landwirtschaft („Intelligente Stichprobe“)
  - Erhebung vergleichbarer Daten für gleiche Messgrößen durch Entwicklung von Methoden zur Übertragung und/oder methodische Abstimmung (z.B. Intensiv-BDF und ICP Level II-Standorte)
  - Ermittlung der Schnittstellen von BDF, ICP Level I/BZE Wald, ICP Level II, LWF zu Forschungsvorhaben wie TERENO und Nutzung von Intensiv-Forschungsansätzen und der Infrastruktur aufwändiger, prozessorientierter Studien durch Formulierung und Kommunikation von: a) Anforderungen der Forschung an be-

hördliche Überwachungsprogramme wie z.B. Parameterbedarf für Modelle sowie b) Anforderungen der behördlichen Überwachung an die Forschung wie z.B. Weiterentwicklung von Umrechnungsfunktionen, Analyse- und Auswertungsverfahren.

- o Rechtliche Regelungen für den ressortübergreifenden Datenaustausch zur Förderung der Transparenz (z.B. zwischen Umwelt- und Landwirtschaftsressort)
- o verstärkte ressortübergreifende Zusammenarbeit der Bereiche: Umwelt, Landwirtschaft, Forsten, Wirtschaft, Finanzen von Bund und Ländern, Fachämtern etc. unter der Koordination des Bundes; Benennung einer koordinierenden Institution; Einrichtung eines ständigen messnetz- und forschungsprojektübergreifenden Koordinierungsgremiums; Arbeitsgruppen für relevante Fragestellungen; Fortführung und z. T. Intensivierung bestehender programminterner Gremien.

→ verantwortliche Akteure: Bund, Umwelt-, Forst-, Landwirtschaftsbehörden der Bundesländer, universitäre und außeruniversitäre Forschungseinrichtungen

- **Aktivitäten zur Förderung der Nutzung von Bodendaten in Wissenschaft und Verwaltung**, z.B. vermehrte und regelmäßige Veröffentlichung aufbereiteter Daten und Ergebnisse (z.B. insbesondere bodenzoologischer Daten aus der Boden-Dauerbeobachtung, landwirtschaftliche Dauerfeldversuche)

- **Optimierung der Untersuchungskonzepte und Auswerteverfahren:**
  - o Systematische, messnetzübergreifende Untersuchung der Kosten der Messprogramme zur Steigerung der Transparenz, zur Beurteilung von Einsparpotenzialen und eines ggf. künftig entstehenden Mehraufwandes, der dann mit dem Zugewinn an Aussagekraft der Datensätze in Beziehung gesetzt werden kann;
  - o Orientierung an der Methodik bestehender Untersuchungen bei Neuaufnahme oder Ergänzung von Monitoring- und Erhebungsaktivitäten, möglichst auch im internationalen Rahmen, um Vergleichbarkeit zu gewährleisten;
  - o Überprüfung und Anpassung von Parameterumfang, Messintervallen und -intensität an themenspezifischen Anforderungen (vgl. Tab. 3.6 und Tab. 6.1) unter Berücksichtigung der Kosteneffizienz;
  - o Harmonisierung der Probenahmeverfahren, insbesondere hinsichtlich der Überwachung von C und N (Trennung Humusauflage von Mineralboden, Entnahmetiefen);

- o Vereinheitlichung der methodischen Umsetzung des Messprogramms auf den vorhandenen BDF-Flächen insbesondere im Bereich Bodenbiologie und Bodenphysik: Vereinbarung standardisierter Mess-/ Bestimmungsverfahren;
- o Entwicklung von validierten und nachvollziehbaren Methoden zur Übertragung von Aussagen in die Fläche über die Verknüpfung von Messdaten mit flächenhaft dokumentierten Bodeneigenschaften für die Freisetzung von Klimagasen aus Böden sowie für mikrobiologische und zoologische Daten;
- o Länder- und/oder messnetzübergreifende Zusammenführung von Messdaten für Auswertungen, um auf eine Vereinheitlichung der heterogenen Datenpools hinzuwirken und wissenschaftliche und wirtschaftliche Synergieeffekte zu erzielen.

→ verantwortliche Akteure: Umwelt-, Forst-, Landwirtschaftsbehörden der Bundesländer; Bund (Koordination)

- **Optimierung von Dokumentation und Datenhaltung**
  - o Verbindliche Vereinbarung der Anwendung eines Methoden-Codes bzw. der Anwendung eines durch Übersetzungsschlüssel kompatiblen Dokumentationssystems zur Vereinheitlichung der Methodendokumentation mit dem Ziel, einen Austausch vergleichbarer Daten zu ermöglichen;
  - o Verbindliche Vereinbarung einer einheitlichen Metadatenerfassung und Aktivitäten zur Verbesserung des Zugangs zu Bodendaten.

→ verantwortliche Akteure: Umwelt-, Forst-, Landwirtschaftsbehörden der Bundesländer; Bund (Koordination)

- **Integration der Daten und Messergebnisse in Forschungsaktivitäten**, indem jedes Forschungsprojekt (BMU, BMBF, DFG) bestehende Messstandorte / Beobachtungsprogramme in den Forschungsansatz einbeziehen muss

→ verantwortliche Akteure: Ausschreibende Institutionen von BMU, BMBF, DFG, Netzwerk Bodenwissenschaften bei acatech (Deutsche Akademie der Technikwissenschaften)

- **Berücksichtigung der laufenden Aktivitäten der EU (JRC)**, um künftig eine Nutzung von Daten auf allen Ebenen zu ermöglichen

→ verantwortliche Akteure: Bund (z.B. BGR, UBA, vTI)

Für eine erfolgreiche und effiziente Nutzung von Bodendaten ist eine **finanziell angemessene Ausstattung** der entsprechenden Forschungs- und Transferaktivitäten erforderlich, z.B. Co-Finanzierung durch Bund, EU u. a.

Themenspezifische Handlungsempfehlungen

Um die vorangehend beschriebene Strategie je nach Fragestellung zu konkretisieren, sind themenspezifische Empfehlungen in Tabelle 6.1 aufgeführt. Die Tabelle fasst die Empfehlungen, die in Rahmen der detaillierten Analyse der Dateneignung in Kapitel 3.3 abgeleitet wurden, zusammen.

Tab. 6.1: Themenspezifische Empfehlungen für die Anpassung der Programme des Bodenmonitoring und der Bodenzustandserhebung an Anforderungen der Klimafolgenforschung und Anpassung

Thema	Empfehlungen zur Anpassung von Bodenmonitoring und Bodenzustandserhebung
Nichtstofflicher Bodenzustand (Erosion, Verdichtung)	▪ Monitoring von Erosion in ausgewählten Agrarregionen unter Berücksichtigung von Klima, Geomorphologie, Boden auf verschiedener Skalenebene von Plot bis EZG unter der Gewährleistung einer Mindestlaufzeit von 20 bis 30 Jahren. ▪ Daten können so für Prozessstudien, Validierung, Anpassung oder Neuentwicklung von Erosionsmodellen und Bewertungsmethoden auf Plot- (Einzelhang-) bzw. Einzugsgebietsebene sowie zur Beobachtung von Veränderungen des Erosionsgeschehens (durch Klima, Bewirtschaftung oder deren Wechselwirkung) genutzt werden. Schwerpunkt soll dabei die agrarische Landnutzung sein. Das Verfahren soll wie folgt aufgebaut werden: o Messung des Abtrages auf Einzugsgebiets-Ebene o Erfassung des Abtrages auf Schlag- (Plot-)ebene auf ausgewählter Anzahl an Schlägen o Periodische Messung über ^{137}Cs über längere Zeiträume. o Gleichzeitige Erfassung von Landnutzung, Klima, Abfluss und anderen relevanten Daten ▪ In Bezug auf Bodenverdichtung sind keine Anpassungen erforderlich.

Thema	Empfehlungen zur Anpassung von Bodenmonitoring und Bodenzustandserhebung
Bodenwasser-haushalt	▪ Langfristige und zeitlich hochauflösende Messung von bodenhydrologischen Kenngrößen mit einheitlichen Methoden an allen Standorten der Intensiv-BDF, sofern dies nicht bereits erfolgt (Mindestparameterumfang und Frequenzen siehe Tab. 3.6). ▪ Abschätzung der Wasserhaushaltssituation wie im Rahmen der BZE II vorgesehen, z.B. auf der Grundlage von einfachen, vorliegenden modellierten Klimadaten und unter zusätzlichem Einsatz entsprechender Wasserhaushaltsmodelle. ▪ Kopplung der Erhebung von Bodenfeuchtedaten mit anderen Fragestellungen (Synergieeffekte), z.B. Programme zu Empfehlungen der Befahrbarkeit von landwirtschaftlichen Nutzflächen. ▪ Verwendung vorliegender Datensammlungen, die kurze Zeiträume abdecken (z.B. BIOSOIL Demonstration Project) als Ergänzung und zur Er-gebnisvalidierung der Auswertung langjähriger Zeitreihen. ▪ Berücksichtigung der 500 Messstellen des DWD und regionaler Monitoring-Programme der Bodenfeuchte bei Auswertungen zu Auswirkungen des Klimawandels. ▪ Zukünftige neue Messungen von Parametern des Bodenwasserhaushaltes sollten sich im Umfang und Intervall / Zeitpunkt mindestens an bestehenden Untersuchungsprogrammen orientieren, um eine Vergleichbarkeit der Daten zu ermöglichen (z.B. Ausrichtung auf die Messzeitpunkte assoziierter Niederschlagsmessungen).
Stoffhaushalt, stoffliche Bodenbelastung	▪ Erhebung sensibler Parameter zur Untersuchung der Veränderungen der OBS. Diese sollten in der Lage sein, saisonale Änderungen/Einflüsse (z.B. Bewirtschaftungs- und/oder Klimaänderungen) treffgenau und möglichst zeitnah abzubilden. Integration unterschiedlich stabiler C-Fraktionen der OBS in zukünftige regelmäßig durchzuführende Messprogramme ▪ Eindeutige Definition der Datenanforderungen an OBS-Modelle für das Monitoring, einschließlich einer geeigneten Parametrisierung. ▪ Anpassung der Beprobungsintervalle, um die zeitliche Stoffdynamik (z.B. Saisonalitäten) adäquat zu detektieren, Bewertung der ökologischen Wirksamkeit, der zeitlichen und räumlichen Auflösung. ▪ Verfügbarmachung von mindestens regionenspezifischen Informationen aus der VDLUFA-Düngeempfehlung. ▪ Detaillierte Erfassung der chemischen Zusammensetzung des Niederschlags sowie des Staubniederschlags. ▪ Überprüfung der erfassten Parameter hinsichtlich organischer Schadstoffe (insbes. Biozide). ▪ Detaillierte Dokumentation der land- und forstwirtschaftlichen Nutzung. ▪ Einführung kürzerer Messabschnitte auch zu unterschiedlichen Jahreszeiten an ausgewählten Standorten, um den zeitlichen Trend und Extremjahre besser erfassen zu können. ▪ Integration mobiler Fraktionen von Spurenmetallen in das Basis-BDF Messprogramm (z.B. NH_4NO_3-Extraktion), sofern nicht bereits enthalten. ▪ Wiederholte Untersuchungen mit gleichem Erhebungsraster und vergleichbaren Methoden zur Erfassung der Veränderungen im Bodenzustand. ▪ Messung der Ausgasung schädlicher Stoffe auf repräsentativen, ausgewählten Standorten unter Berücksichtigung der zeitlichen Dynamik. ▪ Einbeziehung der Unterböden bei Beprobung, Analyse, Interpretation und Bewertung. ▪ Berücksichtigung der Sonderrolle besonders sensibel reagierender Organoböden (Moore, Auenböden).

Thema	Empfehlungen zur Anpassung von Bodenmonitoring und Bodenzustandserhebung
Bodenmikrobiologie	▪ Bundesweite Messung und Ableitung von mikrobiellen Kenngrößen (vgl. Tab. 3.6) ▪ Verkürzung der Messabschnitte für mikrobiologische Kennwerte insbesondere bei Intensiv-BDF (aber auch bei Basis-BDF wünschenswert), um saisonale Entwicklungen erfassen zu können ▪ Fortsetzung, Intensivierung und Erweiterung der bodenmikrobiologischen Erhebungen auf bereits untersuchten BDF, da nur über Zeitreihen Veränderungstendenzen diagnostizierbar sind.
Bodenzoologie	▪ Erfassung der Regenwürmer und einer Gruppe der Mesofauna auf BDF aller Bundesländer (vgl. Tab. 3.6). ▪ Fortsetzung der bodenzoologischen Untersuchungen auf bereits untersuchten BDF. ▪ Anpassung der Messhäufigkeit für Gefügeparameter, Lagerungsdichte, Porengrößenverteilung und Humusform sowie bei der Erfassung Grundwasserflurabstand auf grundwasserbeeinflussten Standorten. ▪ Anpassung der Dokumentation des Grundwassermanagements für drainierte Standorte und der Dokumentation der Bewirtschaftungsmaßnahmen (vgl. Tab. 3.6). ▪ Messung der Bodentemperatur auf ausgewählten Intensiv-BDF-Standorten in Kombination mit bodenbiologischen Untersuchungen.
Klimarelevante Gase	▪ Etablierung und Instrumentierung von etwa 10 bis 15 (ICP Level-II / Intensiv-BDF) ausgewählten, regional repräsentativen Standorten zur kontinuierlichen Messung der Spurengasdynamik unter Berücksichtigung bereits etablierter Standorte (Niedersachsen, Hochschulen, außeruniversitäre Forschung) im Rahmen einer komplementären Strategie. ▪ Direktmessung der Spurengasfreisetzung von relevanten Bodengesellschaften und Landnutzungstypen. ▪ Modelluntersuchungen zum Einfluss des Klimawandels auf die Spurengasemission unter Nutzung von validierten Modellen.
Landnutzung	▪ Konsequente Integration bestehender bzw. Etablierung neuer landwirtschaftlicher Dauerfeldversuche zur langfristigen Untersuchungen komplexer Zusammenhänge zwischen Bewirtschaftungssystemen und Bewirtschaftungsintensität in repräsentativen Agrarregionen.

Verknüpfung und interdisziplinärer Einsatz von Daten

Möglichkeiten für eine Kombination von Daten aus Programmen des Bodenmonitoring und der Bodenzustandserhebung bestehen z.B. in Bezug auf Messdaten zur Ausgasung von Schadstoffen und Emissionen klimarelevanter Gase (ggf. gleiche Probenahmetechnik). Weiterhin bestehen Zusammenhänge hinsichtlich der maßgeblichen Steuergrößen für Veränderungen des Bodenzustands. So sind die direkten Messgrößen für den Bodenwasserhaushalt gleichzeitig maßgebliche Steuergrößen für Stoffhaushalt und biologische Aktivität im Boden. Humus und gelöster organischer Kohlenstoff (DOC) sind einerseits direkte Messgrößen für Veränderungen des Kohlenstoffvorrats von Böden und andererseits entscheidende Steuergrößen für den Stoffhaushalt und die biologische Aktivität.

Für eine gemeinsame Verwendung von Daten aus unterschiedlichen Messprogrammen, ist die Einrichtung von Datenschnittstellen erforderlich.

Forschungsbedarf

Vertiefende Untersuchungen sind erforderlich, um Defizite bzgl. der Datenauswertung und -verknüpfung auszuräumen. Empfohlen werden Vergleichsstudien für unterschiedliche Untersuchungsverfahren, um eine Vereinheitlichung von (programminternen) Messdaten und damit Auswertungen größerer, messnetz- und/oder länderübergreifender Datenbestände zu ermöglichen. Um Erkenntnisse zu den Wirkungen des Klimawandels auf den Bodenzustand zu gewinnen, können fragestellungsbezogene, länderübergreifende Datenauswertungen dienen. Hierfür sind unterschiedliche Daten räumlicher und vor allem zeitlicher Ausprägung erforderlich. Im ersten Schritt sollte im Wesentlichen mit den bereits erhobenen und digital verfügbaren Daten gearbeitet werden (Flächen- und Punktdaten). Hierbei kann festgestellt werden, ob die vorhandenen Daten in ausreichender Qualität und Quantität vorliegen. Gleichzeitig können auf diese Weise auch potentielle Schwächen des Datensatzes identifiziert und behoben werden.

Weiterhin besteht vertiefender Forschungsbedarf und Bedarf für Datenauswertungen zur Klärung themenspezifischer Fragen zu Änderungen des Bodenzustands aufgrund veränderter Klimabedingungen (vgl. Tab. 6.2).

Tab. 6.2: Themenspezifische Empfehlungen für vertiefende Untersuchungen/ Forschungsbedarf

Thema	Empfehlungen für vertiefende Untersuchungen
Nichtstofflicher Bodenzustand (Erosion, Verdichtung)	▪ Abschätzungen der durch Bodenerosion eingetragenen Sedimente in Fließgewässer sind für unterschiedliche Nutzer relevant, z.B. die Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG). Das heißt diesbezügliche Daten liegen an unterschiedlichen Stellen ggf. schon vor, oder werden nicht zuletzt auch vor dem Hintergrund der zu erwartenden Klimaänderungen zukünftig vermehrt erhoben. Zu prüfen wäre daher, inwieweit in einem ressortübergreifenden Ansatz entsprechende Synergien genutzt werden können. Denkbar wäre ein gestuftes Verfahren: a) Identifikation potenziell gefährdeter Gebiete als Ergebnis einer Modellierung potenzieller Erosionsgefährdung auf kleiner Maßstabsebene (bundesweit – Maßstab 1 : 1.000.000), b) Modellierung der landnutzungsabhängigen (aktuelle) Erosionsdisposition auf regionaler Maßstabsebene (z.B. 1 : 200.000), c) Definition geeigneter Einzugsgebiete (Größe, Landnutzung , ggf. Forschungsbedarf) und Zeitreihen, d) Messung von Sedimentfrachten; parallel intensive Beobachtung des Erosionsgeschehens zur Ermittlung von Sediment-Liefer-Verhältnissen

Thema	Empfehlungen für vertiefende Untersuchungen
Bodenwasser-haushalt	▪ Erstellung von Wasserhaushaltsmodellen zum Einfluss von erforderlichen landwirtschaftlichen Bewirtschaftungsmaßnahmen (z.B. Bewässerung) im Hinblick auf die Nutzungskonkurrenz von Wässern bei steigenden Temperaturen ▪ Nutzung von Bodenwasserhaushaltsmodellen zur gezielten Beratung im Bereich der landwirtschaftlichen Flächennutzung (z.B. Zeitpunkt der Bearbeitung, Anpassung der Kulturpflanzen) ▪ Identifikation von hydromorphen Böden, die aufgrund von klimatischen Veränderungen trocken fallen können und somit entscheidende Veränderungen bezüglich des Stoffhaushaltes (z.B. Methanbildung beim Trockenfallen von Mooren) erfahren können.
Stoffhaushalt, stoffliche Boden-belastung	▪ Einbeziehung von Unterböden in Modelle ▪ Messung der Ausgasung von Schadstoffen ▪ Verknüpfung von Stoffhaushalt- und Erosionsmodellen vor allem für landwirtschaftliche Flächen ▪ Intensivierung von Untersuchungen der klimasensibleren Bodenlösung
Boden-mikrobiologie	▪ Erfassung von Veränderungen der mikrobiellen Bodenlebensgemeinschaft
Bodenzoologie	▪ Einfluss von Bewirtschaftung und Nutzungsänderungen auf die Bodenlebensgemeinschaft, auch im Hinblick auf Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel. ▪ Zusammenhang zwischen mittlerem Grundwasserstand und dem Vorkommen tiefgrabender Regenwürmer (oder allgemein zwischen einem geeigneten Parameter der Bodenfeuchte und der Bodenlebensgemeinschaft). ▪ Zusammenhänge zwischen bodenphysikalischen Faktoren (Gefüge, Porenvolumen, Porengrößenverteilung) und Bodenlebensgemeinschaft im Hinblick auf Verdichtung, Versickerung, Verschlämmung und Erosionsneigung. ▪ Weiterentwicklung des Expertenwissens zu Referenzwerten für die untersuchten Tiergruppen für alle Naturräume Deutschlands ▪ Auswertung vorhandener Daten zu relevanten Tiergruppen auf europäischer Ebene, um klimawandelbedingte Veränderungen von Struktur und Funktion der Bodenlebensgemeinschaft besser bewerten und abschätzen zu können.
Klimarelevante Gase	▪ Direktmessung der Spurengasfreisetzung von Mooren unter Acker, Forst, auf renaturierten Standorten u.a. auch nach Abtorfung (mit zeitlicher Dynamik) ▪ Regionalisierung der Messwerte: Parametrisierung der wesentlichen Steuerungsgrößen in Abhängigkeit flächendeckend digital verfügbarer Daten bzw. unter Nutzung der Fernerkundung ▪ Konzeptionelle Versuche zur Auswirkung von Klimawandel auf Spurengasemissionen in Form eines multifaktoriellen Designs ▪ Langzeitwirkungen atmogener N-Deposition auf ökosystemare C- und N-Umsetzungen mit besonderer Berücksichtigung der C-N-Interaktionen in Böden bei Klimawandel (Stabilität der C_{org}-/N_{org}-Fraktionen in Böden) ▪ Entwicklung und Förderung klimaschonender Verfahren der Moornutzung (Erlen-, Schilf-, Sphagnenkultur) und Modelluntersuchungen zum Einfluss des Klimawandels auf die Torfakkumulation ▪ Direktmessung der Spurengasfreisetzung und Kohlenstoffbilanzen für hydromorphe Böden unter Grünland und nach Grünlandumbruch unter Berücksichtigung von Entwässerungsmaßnahmen ▪ Innovative, schnell durchführbare Bestimmung der verschiedenen C-Fraktionen in Böden (z.B. Infrarotmethoden)

6.2 Umsetzungskonzept für die Bereitstellung und effiziente Nutzung von Bodendaten

W. Kappler; R. Baritz

Auf dem Weg hin zu einer vernetzten Bereitstellung und effizienten Nutzung von Bodendaten aus Bodenmonitoring und Bodenzustandserhebung stehen Aufgaben im Bereich der Metadatenbereitstellung und Messdatenbereitstellung an (s. Kap. 4)

Die Qualität der künftigen Recherchemöglichkeiten, der Zugriffsmöglichkeiten und der Verwertbarkeit klimarelevanter Bodenmessdaten hängt **aus technischer Sicht** vor allem ab von

- der Qualität der Metadatendokumentation im Sinne des Verwendungszweckes,
- der Verfügbarkeit einheitlicher Standards zur Dokumentation der Daten (Metadatenprofil),
- der Verfügbarkeit von Datenportalen bzw. Datendienste, die bodenkundliche Messdaten als standardkonforme Dienste bereitstellen und schließlich
- der Verfügbarkeit einer einheitlichen Datenkodierung (bodenkundliches Applikationsschema).

Hinzu kommen **organisatorische und rechtliche Aspekte** im Hinblick auf die Bereitschaft, Daten unter bestimmten Bedingungen (Nutzungsvereinbarungen, Urheberrechte, Datensicherheit etc.) publik zu machen. Diese Bereitschaft muss gefördert werden, indem mit den potenziellen Datenprovidern in weiteren gemeinsamen Gesprächen die Notwendigkeit und der Nutzen einer Datenbereitstellung einerseits und einer gemeinsam vereinbarten Standardisierung andererseits, diskutiert werden. Das vorliegende Umsetzungskonzept thematisiert daher neben der Koordinierung gemeinsam abgestimmter Aktivitäten, die Erarbeitung eines Metadatenprofils und die Bereitstellung von Metadaten sowie die Bereitstellung von bodenkundlichen Messdaten.

Grundsätze des Umsetzungskonzeptes

Das Umsetzungskonzept geht von einer schrittweisen und iterativen Umsetzung aus, die regelmäßig - anhand der eigenen Ergebnisse sowie der Entwicklungen in den Inf-

rastruktur- und Forschungsprojekten – nachjustiert wird. Der Konkretisierungsgrad der Vorschläge nimmt daher mit jedem Schritt ab.

Das Umsetzungskonzept geht davon aus, dass für die Verbesserung der Datenverfügbarkeit Internettechnologien eingesetzt werden. Dabei spielt es in der Regel keine wesentliche Rolle, wo funktionale Komponenten realisiert werden. Dies betrifft einfache Webauftritte, Portale, aber auch Dienste. Wer die Komponenten federführend erstellt und über welche Adressen sie erreicht werden können, ist nicht Gegenstand des Umsetzungskonzeptes, sondern wird gemeinsam zwischen den beteiligten Akteuren zu besprechen sein.

Schritt 1: Erste Schritte zur Kooperation und Erstellen von Metadaten (ca. 2011)

- Die Akteure und Datenhalter auf Bundesebene arbeiten eine gemeinsame Position aus, wie die vorgelegten Vorschläge innerhalb eines „Fachnetzwerkes Boden“ umgesetzt werden können. Es gilt dabei die einzelnen Ressorts (BMU, BMWi, BMELV, BMVBS) für die gemeinsame Sache, Bodendaten effizient zu vernetzen, im Sinne der Vorgaben und Anforderungen zu gewinnen. Auch die Teilnahme von Vertretern der Länder, aus Bund-Länder-Arbeitsgremien sowie eine Vernetzung mit BMBF/TERENO wird hier als sinnvoll erachtet.
  → verantwortliche Akteure: Akteure und Datenhalter auf Bundesebene, d.h. UBA, BGR, vTi, DWD; zuständige Ministerien

- In einem solchen Fachnetzwerk Boden wird unter Berücksichtigung der Interessen der Datenbesitzer/-provider diskutiert,
  - welche Daten relevant sind,
  - welche Daten bereitgestellt werden können und sollen bzw. es wird festgehalten, welche Daten ohnehin schon - z.B. im Rahmen von INSPIRE - bereitgestellt werden,
  - welche Metainformationen für eine zielgerichtete Recherche nach relevanten Bodendaten erforderlich sind und
  - welche Portale und Infrastrukturen genutzt werden sollen.

  → verantwortliche Akteure: Akteure und Datenhalter auf Bundesebene, d.h. UBA, BGR, vTi, DWD

- Die Entwicklung in den parallel laufenden Infrastrukturprojekten (v.a. PortalU, GDI-DE, GS SOIL) und Standardisierungsgremien (v.a. INSPIRE, ISO, OGC) wird beobachtet und validiert.
  → verantwortliche Akteure: zu benennende Akteure aus dem Fachnetzwerk Boden

- Es wird ein Metadatenkatalog für die Daten aus Bodenmonitoring und Bodenzustandserhebung auf Basis eines auf Bund-/Länderebene abgestimmten Metadatenprofils (in Anlehnung an das vorgeschlagene BOKLIM-Metadatenprofil) erstellt. Die Erfassung erfolgt nach Möglichkeit und nach Abstimmung zwischen den Akteuren in Portal U / InGrid.
  → verantwortliche Akteure: Akteure und Datenhalter auf Bundesebene und in den Ländern

- Falls erforderlich wird mit der PortalU- Koordinierungsstelle über Anpassungsmöglichkeiten des Katalogs bzw. der Portalformulare verhandelt.
  → verantwortliche Akteure: Akteure und Datenhalter auf Bundesebene; Service-/Portaldienstleister

- Die Ersterfassung der Metadaten erfolgt in Abstimmung mit den Datenprovidern zentral durch einen Dienstleister für die im Kapitel 4.2 gelisteten Datenbestände, um die Eintrittsschwelle niedrig zu halten (Aufwand) und von Beginn an eine gewisse Einheitlichkeit zu erreichen. Die Dokumentation wird auf der Ebene der - in sich - einheitlich strukturierten Datenbestände vorgenommen, die künftig als ein Datendienst vorstellbar sind, also z.B. ICP Forest Level II auf Bundesebene, Intensiv-BDF auf Länderebene, sofern die Datenbesitzer einverstanden sind. Die erhobenen Metadaten werden durch die Datenbesitzer qualitätsgeprüft und zur Publikation im Portal U-Metadatenkatalog freigegeben und später weitergepflegt (gemäß INSPIRE-Vorgaben).
  → verantwortliche Akteure: Dienstleister, Akteure und Datenhalter auf Bundesebene sowie in den Ländern; Forschungseinrichtungen

- Für die Recherche kann je nach Anforderungen oder Wunsch der beteiligten Akteure PortalU selbst genutzt werden, oder ein eigenes Rechercheformular/-portal aufgebaut werden, dass die zur Verfügung stehende PortalU-Schnittstelle nutzt, um Suchabfragen zu formulieren. Ein eigenes Bodendaten-Rechercheportal hätte den

Vorteil, in einer umgebenden Dachinternetseite die potenziellen Nutzer direkt anzusprechen und gezielt auf die Anwendungsbereiche der Daten aufmerksam machen zu können. Ein spezifisch entwickelter Recherche-Client könnte sinnvolle und mögliche Suchparameter und –kombinationen komfortabel bereitstellen, so dass sehr viel zielgerichteter recherchiert werden kann als in PortalU selbst (z.B. wo liegen Messdaten zu bestimmten Parametern im Boden vor?). Es sollte durch das Fachnetzwerk Boden entschieden werden, welche Variante zu realisieren ist.
→ verantwortliche Akteure: Fachnetzwerk Boden; potenzielle Datennutzer aus der Klimaforschung und ggf. weiteren Anwendungsbereichen (Definition der Suchkriterien); Service-/Portaldienstleister

- Bekanntgabe der zentralen Adressen zur Recherche auf einschlägigen Webseiten und Portalen, damit die Einstiegsseite über eine einfache Suche in gängigen Suchmaschinen gefunden wird.
  → verantwortliche Akteure: Akteure und Datenhalter auf Bundesebene sowie in den Ländern; Forschungseinrichtungen

Varianten und Erläuterungen:

Für die Metadatenerfassung wird zunächst PortalU verwendet. Die Beschränkungen im Datenmodell (s. Kap. 4.5.3) werden in diesem Kontext geprüft. Gegebenenfalls wird ein erweiterter Katalog vorgeschlagen, der näher an den Anforderungen von künftigen INSPIRE-Spezifikationen ist (z.B. erweiterte Möglichkeiten v.a. im Bereich der parameterspezifischen Kriteriendokumentation - innerhalb oder außerhalb von Portal U).

In Schritt 1 wird auch geprüft, ob geeignete Portale aus anderen Kontexten bestehen, die für weitere Realisierungsschritte zu betrachten sind.

Ergebnis von Schritt 1:

Interessierte Nutzer finden mit einer Standardsuchmaschine im Internet (z.B. Google) schnell das Portal zur Recherche von Bodendaten (direkt, im Falle eines eigenen Portals) oder (indirekt) über die qualifizierten Links auf einschlägigen Webseiten (z.B. im Falle von Portal U).

Bei der Suche nach relevanten Bodendaten ist es möglich, spezifische Kriterien festzulegen, um hinreichend genaue Treffer zu bekommen. Bei der Festlegung der relevanten Kriterien sind die potenziellen Nutzer aus der Klimaforschung und ggf. weiterer Anwendungsbereiche zu Rate zu ziehen.

Die Recherche liefert also eine Trefferliste mit geeigneten ausführlichen Metadaten, mit der der Nutzer für seine jeweilige Fragestellung beurteilen kann, ob die gelisteten Bodendaten (hier sind nicht nur die klimarelevanten Bodendaten gemeint) für ihn tatsächlich von Interesse sind. Die Metadaten enthalten einen kompetenten Ansprechpartner, der dem Nutzer Rede und Antwort stehen kann, und ggf. weiterführende Links zu Online-Ressourcen u.a. Schließlich kann der potenzielle Nutzer die Daten, nachdem er prinzipielle Eignung geprüft hat, bei Bedarf anfordern. Damit werden die im Fokus des BOKLIM-Vorhabens stehenden Datenbestände aus Bodenmonitoring und Bodenzustandserhebung für Nutzer in der Klimasystem-, Klimafolgen- und -anpassungsforschung erschlossen. Gleichzeitig bieten sich Recherchiermöglichkeiten für Datennutzer anderer Anwendungsbereiche (z.B. Bodenschutz, Biodiversitätsstrategie).

Schritt 2: Feinkonzept zur Realisierung der Dateninfrastruktur für Messdaten und initiale Realisierungsschritte erster Dienste (ca. 2012)

- Bei der Realisierung der weiteren Umsetzungsschritte ist es wichtig, die Ergebnisse der aktuell laufenden Projekte und Prozesse (INSPIRE, GDI-DE, OGC/ISO, GS SOIL, PortalU, Fachinformationssysteme des Bundes und der Länder) zu analysieren und in den Umsetzungsprozess einzubringen. Das Fachnetzwerk Boden wirkt weiterhin maßgeblich mit.
  → verantwortliche Akteure: Akteure und Datenhalter auf Bundesebene, d.h. UBA, BGR, vTi, DWD

- Ziel der Umsetzungsphase ist die Erarbeitung eines Feinkonzepts zur Realisierung der Dateninfrastruktur für Messdaten. Dieses Konzept schlägt vor, welche (ggf. bereits in anderen Portalen bestehenden) Komponenten verwendet werden können, welche Komponenten angepasst oder neu entwickelt werden müssen (z.B. das Eingangsportal) und wie Schnittstellen für dezentrale Dienste ausgestaltet werden. Technische und fachliche Spezifikationen werden bis zur Implementierungsgenauigkeit konkretisiert. Eine mögliche Architektur ist im Zukunftsszenario beschrieben (s. Kap. 4.6).

Es wird ein Fachschema auf der Basis der vorliegenden bodenfachlichen und technischen Spezifikationen definiert oder ggf. auch nur festgelegt, auf das die Datenprovider die bestehenden Datenbestände ausrichten können.
→ verantwortliche Akteure: Akteure und Datenhalter auf Bundesebene, d.h. UBA, BGR, vTi, DWD sowie in den Ländern

- Bestehende und neu entstehende Web-Daten-Ressourcen werden sukzessive über die Metadaten auffindbar und nachdem alle Nutzungsbedingungen geklärt sind auch nutzbar gemacht.
  → verantwortliche Akteure: Datenhalter auf Bundesebene sowie in den Ländern; Forschungseinrichtungen

- Den Beteiligten kommt weiterhin die Aufgabe zu, den Prozess hin zu einer komponentenbasierten Bodendateninfrastruktur – und sei es auch nur als Teil einer bestehenden übergeordneten Dateninfrastruktur - mit zu gestalten.
  → verantwortliche Akteure: Datenbesitzer, Datenprovider, zuständige Behörden, potenzielle Datennutzer, Service-/Portaldienstleister

Mögliche Varianten und Erläuterungen:

Mögliche Varianten hängen an den Zwischenergebnissen aus der Akteurskoordination, der Recherche nach geeigneten Portalen und den Ergebnissen der Fachspezifikationen. Schon jetzt absehbar sind folgende größere Varianten:

A. Entwicklung eines Fachportals, das vertikal und horizontal hochvernetzt konzipiert ist und so wenig wie möglich selbst implementiert. Damit ist folgendes gemeint: Das Fachportal erschließt über eine eigene Benutzeroberfläche (Client), das bestehende Suchdienste nutzt, Daten aus mehreren kaskadierend vernetzten Metadaten-Katalogen. Das Portal stellt die entsprechenden Metadaten und womöglich auch entsprechende Web Map Services für die Geoobjekte/Erhebungsstellen in den einzelnen Datensammlungen graphisch dar. Hierdurch kann zu den Einzelobjekten navigiert werden, um die entsprechenden Metadaten und ggf. auch die Einzeldaten zu den Geoobjekten einzusehen. Dienste sind online zugreifbar, soweit man dazu – falls notwendig - autorisiert ist. Datendienste sind standardisiert interoperabel. Sie werden i.d.R. nicht vom Fachportal

unterhalten, sondern von den Datenprovidern. Für alle Datenprovider, die dazu nicht imstande sind, besteht innerhalb des Fachportals oder in einer dritten Dateninfrastruktur eine alternative Möglichkeit eigene Datendienste bereitzustellen und einzubinden.

B. Man beschränkt sich auf die Entwicklung eines Systems, das **nur bestehende, ggf. auch heterogene Datendienste erntet** (z.B. aus bBIS, ICP Forest etc.), da die Entwicklung interoperabler, einheitlicher Datenbereitstellungsdienste nicht geeignet ist (aufwändig, es besteht kein Konsens etc.). Voraussetzung wäre, dass ein Zugriff auf die Daten möglich ist. Unter Umständen erfüllen die Datensysteme auch keine einheitlichen Fachmodelle.

C. Es werden zunächst eine **Recherchemöglichkeit und eine Linkliste** realisiert: Gegebenenfalls zeigen die Metadatensätze zunächst auch gar nicht auf Datendienste, sondern auf Links innerhalb oder außerhalb des Fachportals mit weiteren Informationen. Weitere Ausbauschritte sind zu einem späteren Zeitpunkt immer noch möglich.

Weitere Untervarianten könnten sein, dass eine spezifische Metadatenkatalogerweiterung erforderlich ist, um die BOKLIM-spezifischen Metadatendetails exakt abzubilden. Diese Details werden mit dem PortalU-Metadatensatz kombiniert, um den Recherche-anforderungen zu genügen.

Schritt 3: Realisierung und Inbetriebnahme einer Dateninfrastruktur mit interoperablen Diensten (ca. 2013-2014)

- Die Realisierung kann schrittweise für unterschiedliche Varianten (s. Schritt 2) erfolgen.
  → verantwortliche Akteure: Service-/Portaldienstleister, Datenprovider

- Die Datendienste werden sukzessive entwickelt, an die Dateninfrastruktur angebunden und bereitgestellt.
  → verantwortliche Akteure: Datenprovider

Zusammenfassende Darstellung der Aufgaben von Datenbesitzern und Datenproviderern

Der Erfolg der Umsetzung des Konzepts zur effizienten Datenbereitstellung und –nutzung hängt entscheidend von der Mitwirkung der Datenbesitzer und Datenprovider ab. Folgende Leistungen wären im Rahmen des Umsetzungskonzepts für die Datenbesitzer und Datenprovider zu erbringen:

- Freigabe der von BOKLIM identifizierten Bodendatensammlungen zur Weiterverwendung durch Dritte (gemäß festzulegender Nutzungsvereinbarungen)
- Weitergehende Analyse bestehender Datensammlungen und Metadaten, hinsichtlich ihrer Relevanz für boden- und klimarelevante Fragestellungen und Konformität zu den vorgelegten Empfehlungen
- Identifizierung weiterer - aus Sicht der Datenprovider - relevanter Datensammlungen
- Pflege (ggf. auch selbst Ersterfassung) der BOKLIM- und INSPIRE konformen Metadaten
- Abschließende Aufbereitung der relevanten Datensammlungen gemäß der im Schritt 2 definierten Datenmodelle/Schemata
- Implementierung der entsprechenden Datendienste (technisch und organisatorisch), zur interoperablen Bereitstellung der Daten und Anmeldung an den relevanten Katalogdiensten

6.3 Förderung von Information und Kommunikation

ARGE BOKLIM

Die Daten der Bodenzustandserhebung und des Bodenmonitoring leisten einen wichtigen fachlichen Beitrag für Bewertungs- und Planungsfragen unterschiedlicher Ressorts und Fachbereiche. Ebenso liefern sie fachliche Grundlagen für die Bearbeitung aktueller umweltpolitischer Themen wie Klimaanpassung, Reduzierung des Flächenverbrauchs, Nachhaltigkeitsstrategie und Biodiversitätsstrategie (siehe Kap. 3.2.1). Daraus ergibt sich die Notwendigkeit, die Anwendungspotenziale der Bodendaten für interessierte Nutzer bekannter zu machen und bei Bedarf Daten oder Erkenntnisse zur Verfügung zu stellen.

Der Erfolg für einen verstärkten Einsatz von Bodenmonitoring- und Bodenzustandsdaten in der Klimafolgen- und -anpassungsforschung hängt entscheidend von der Mitgestaltung und Vernetzung der beteiligten Institutionen und Akteure auf Seiten der Datenerhebung, -haltung und -nutzung ab. Die Erfahrungen aus der Bearbeitung des BOKLIM-Vorhabens haben bestätigt, dass eine intensive Informations- und Kommunikationsarbeit unerlässlich ist, um verschiedenen Zielgruppen die auf ihre jeweiligen Bedürfnisse zugeschnittenen Informationen und Beteiligungsmöglichkeiten zur Verfügung zu stellen. So kann ein konstruktiver Umgang mit Zielkonflikten und gegensätzlichen Interessen (siehe Tab. 6.3) gefördert werden.

Tab. 6.3: Beispiel für Zielkonflikt

Interesse A		Interesse B
Länder- und ressortübergreifend abgestimmte Untersuchungsstrategie bei Bodenmonitoring und –erhebung mit Nutzung von Synergieefffekten	⇔	Landesspezifisch angepasstes Untersuchungskonzept mit Ausrichtung auf spezifische Fragestellungen und historisch bedingten methodischen Besonderheiten
Akteure: Institutionen Bundesebene (z.B. UBA, BGR, vTI)		Akteure: Datenerheber (z.B. Landesamt)

Künftig gilt es, die vorhandenen Forschungs- und Verwaltungsgremien zu nutzen und einen langfristig fortlaufenden Prozess zu initiieren. Die Koordination dieses Informations- und Kommunikationsprozesses sollte zentral durch eine Institution auf Bundesebene durchgeführt werden, die ressortübergreifend arbeitet und alle Kooperationspartner (z.B. UBA, BGR, vTI) einbindet.

Empfohlen wird die Umsetzung eines Informations- und Kommunikationspakets mit folgenden Bausteinen:

- **Benennung eines Koordinators und Ansprechpartners sowie Einrichtung eines ständigen Koordinierungsgremiums** für messprogramm- und ressortübergreifende Vernetzung bei der Erhebung, Bereitstellung und Nutzung von Bodendaten nach Möglichkeit mit rechtlicher Verankerung („Bodendaten-Netzwerk“ mit der Aufgabe einer zielgerichteten und zielgruppenorientierten Vermarktung von Daten und Forschungsergebnissen bei Entscheidungsträgern und Datennutzern und einer

ressortübergreifenden Koordination). Empfehlungen zur rechtlichen Verankerung der Koordination können z.B. in ressortübergreifende Bund/Länder-Arbeitsgruppen eingebracht werden.

→ verantwortliche Akteure: Bund (Koordination), Umwelt-, Forst-, Landwirtschaftsbehörden der Bundesländer, Ressortforschungseinrichtungen

- **Einrichtung und Betrieb einer übergreifenden Informationsplattform („Dach-Internetseite“) für Bodendaten in Deutschland** mit gebündelten messprogramm- und ressortübergreifenden Angaben zum Angebot, Nutzen und Auffinden von Bodendaten für Anwendungen des Bodenschutzes, der Klimasystem- und Klimafolgenforschung, der Land- und Forstwirtschaft (z.B. Verweise auf Angebote der Länder und PortalU); Verknüpfung mit dem Kompetenzzentrum Klimafolgen und Anpassung (KomPass). Als Grundlage können Inhalte der vorhabensbezogenen Internetseite www.boklim.de genutzt werden. Das Duplizieren von Inhalten anderer Angebote z.B. der Länder sollte vermieden werden; vielmehr soll der Zugang von Datennutzern zu Metadaten und Ansprechpartnern durch strukturierte Verweise erleichtern werden. Die Informationsplattform kann genutzt werden, um auf die Verwendung einheitlicher Begrifflichkeiten, z.B. für Parameter, hinzuwirken und zielgruppenorientierte Informationen anzubieten. Sie kann weiterhin genutzt werden, um die in Bund und Ländern vorliegenden Bodendaten und –karten und die benötigten Methoden zur Regionalisierung und/oder zum Up- und Downscaling besser bekannt und verfügbar zu machen.

→ verantwortliche Akteure: Bund

- **Einrichtung und Betrieb einer Metadatenplattform für Bodendaten in Deutschland unter Nutzung von bestehenden Systemen wie PortalU** (vgl. Kap. 6.2)

→ verantwortliche Akteure: Bund (Koordination), Erhebende Institutionen von Bodendaten

- **Fortschreibung der Broschüre „Mess- und Erhebungsaktivitäten für Böden in Deutschland – Bodendaten für Fragen zu Klimawandel, Klimafolgen und Anpassung“,** um – ergänzend zu digitalen Metadaten – einen Überblick über die vorhandenen Daten zu geben und in gut handhabbarer, gedruckter Form bereitzustellen. Ein Entwurf der Broschüre vom 31.8.2009 liegt aus dem BOKLIM-Vorhaben vor und sollte auf Basis der Beiträge der Teilnehmer des BOKLIM-Workshops ak-

tualisiert werden. Eine langfristige Fortschreibung – z.B. in Form einer Losen-Blatt-Sammlung – ist sinnvoll, um die Angaben bei Änderungen z.B. der Messstandorte oder der gemessenen Parameter, stets aktuell zu halten. Dazu gehört auch eine regelmäßige Fortschreibung der Liste der „Themenkarten des Bundes und der Länder“ (LABO-BOVA 2006).

→ verantwortliche Akteure: Bund (Koordination), Erhebende Institutionen von Bodendaten

- **Aufwertung und Bekanntmachung von repräsentativen Messstandorten durch ein Zertifikat z.B. als „Klimafolgen-Messstation“** im Sinne von Best-Practice-Beispielen für die Erhebung, Nutzung und Verfügbarmachung von Ergebnissen aus Messungen. Es kann eine Wertsteigerung der gemessenen Bodendaten erreicht werden, indem an ausgewählten Stationen der direkte Nutzen von Messdaten für die Nationale Anpassungsstrategie veranschaulicht und der Öffentlichkeit und politischen Entscheidungsträgern vermittelt wird.

→ verantwortliche Akteure: Bund (Koordination), Betreiber der Messprogramme

- **Regelmäßige Durchführung von Informationsveranstaltungen** für Erheber, Halter und (potenzielle) Nutzer von Bodendaten zur öffentlichen Vorstellung, Diskussion und Weiterentwicklung der Datenerhebung und gewonnenen Erkenntnisse aus Erhebung und Monitoring (möglichst jährlich). Besonderer Bedarf besteht für einen verstärkten Austausch der datenerhebenden und koordinierenden Stellen mit den Akteuren der atmosphärischen Klimaforschung, um deren Anforderungen an Bodendaten und deren Verfügbarmachung gerecht werden zu können. Hiermit kann eine deutliche Wertsteigerung von Bodendaten erreicht werden. Es wird empfohlen, die Informationsveranstaltungen an konkreten Themen und an den Bedürfnissen der Zielgruppen auszurichten (z.B. Welche Bodendaten sind zur Verbesserung von Klimamodellen geeignet? Was wissen wir aus Bodenmonitoring und Erhebung über Veränderungen des Kohlenstoffstatus in Böden? Wie können Wasserhaushaltsmodelle für die Klimafolgenabschätzung verbessert werden? In welchem Verhältnis stehen Kosten und Nutzen bei Monitoring und Erhebung? etc.). Eine aufeinander aufbauende Veranstaltungsreihe mit den jeweils zu beteiligenden Zielgruppen sollte im Rahmen eines Konzepts konkretisiert werden.

→ verantwortliche Akteure: Bund (Koordination), Umwelt-, Forst-, Landwirtschaftsbehörden der Bundesländer, Ressortforschungseinrichtungen

- **Ständige Einrichtung von Fachausschüssen zur** Förderung der bestehenden messprogrammspezifischen Abstimmungsprozesse durch Bund-/Länder-Arbeitsgruppen (insbes. für die Boden-Dauerbeobachtung und landwirtschaftlichen Dauerfeldversuche).
  → verantwortliche Akteure: Bund/Länder

- **Regelmäßige Durchführung von ressortübergreifenden Arbeitsgesprächen** mit beteiligten Behörden und bei Bedarf mit externer z.B. wissenschaftlicher Beratung. Ziel der Arbeitsgespräche ist die Bearbeitung konkreter Aufgabenstellungen zur Weiterentwicklung der Datenerhebung, -auswertung und -bereitstellung (z.B. für Themen wie rechtliche Verankerung von Datenerhebung und -austausch, Kosteneffizienz von Monitoring und Erhebungen, Harmonisierung von Untersuchungsstrategien und -verfahren, Monitoringstrategie für Bodenerosion und klimarelevante Gase).

7 FAZIT UND AUSBLICK

C. Kaufmann-Boll, G. Meiners

Die Eignung von Bodendaten aus den wichtigsten bundesweit und dauerhaft betriebenen Programmen des Bodenmonitoring und der Bodenzustandserhebung für die Klimaforschung wurde im BOKLIM-Vorhaben erstmals messnetz- und themenübergreifend bewertet. Im Fokus standen dabei Fragestellungen zur Veränderungen des Bodenzustands aufgrund von erwarteten Klimaänderungen, die im Rahmen der Anpassungsstrategie der Bundesregierung an den Klimawandel thematisiert werden.

Die Ergebnisse des Vorhabens machen deutlich, dass langfristig Messdaten zum Bodenzustand erhoben und vorgehalten werden müssen, um frühzeitig Veränderungen und Beeinträchtigungen des Bodenzustands und der Bodenfunktionen zu erkennen, entsprechend erforderliche Anpassungsmaßnahmen einleiten zu können sowie die Möglichkeiten für eine Erfolgskontrolle der Maßnahmen zu haben.

Es wird der Nachweis erbracht, dass die Programme des Bodenmonitoring und der Bodenzustandserhebung eine Vielzahl wertvoller Daten zur Beurteilung der Wirkungen von Klimaänderungen auf Böden liefern. Je nach Fragestellung und den sich daraus ergebenden Anforderungen eignen sich die Daten 1) für die langfristige Überwachung von Änderungen des Bodenzustands, 2) für Prozessstudien und vertiefende Messungen an repräsentativen Standorten z.B. auch zur Kalibrierung und Validierung von Prognosemodellen sowie 3) für den Einsatz in Modellszenarien zu Veränderungen des Bodenzustands. Sie leisten damit einen wichtigen Beitrag für die langfristigen Arbeiten des Bundes und der Länder zur Klimaanpassung. Die Daten der Bodenzustandserhebung und des Bodenmonitoring sind darüber hinaus ein wichtiger Baustein für Planungsfragen unterschiedlicher Ressorts und Fachbereiche (Umwelt, Land- und Forstwirtschaft, Bodenschutz, Wasserwirtschaft, Gewässerschutz, Energie, Raumplanung). Ebenso sind sie wertvoll als fachliche Grundlagen für die Bearbeitung aktueller umweltpolitischer Themen wie Reduzierung des Flächenverbrauchs, Nachhaltigkeitsstrategie und Biodiversitätsstrategie.

Um das Potenzial der Daten für Fragen von Klimawandel und Anpassung in vollem Umfang nutzen zu können, ist es jedoch notwendig, dass die Programme des Boden-

monitoring und der Bodenzustandserhebung mit Ausrichtung auf konkrete Fragestellungen weiter angepasst und modifiziert werden. Nur so können sie den Anforderungen im Hinblick auf Datenqualität, -belastbarkeit, -vollständigkeit (Parameterspektrum und Messhäufigkeit) sowie Flächen- und Nutzungsrepräsentanz gerecht werden. Hierzu hat die ARGE BOKLIM konkrete Handlungsempfehlungen wie z.B. zur Erweiterung des Parameterspektrums formuliert. Diese sind den jeweils zuständigen Institutionen und Akteuren zugeordnet. Weiterhin wird der Forschungsbedarf aufgezeigt.

Unter dem Aspekt der Kosteneffizienz sollte die Zusammenarbeit zwischen den Datenbereitstellern und den Datennutzern verbessert und Synergiepotenziale genutzt werden. Zu ersten Vernetzungen der beteiligten Institutionen und Akteure führte die Präsentation und Diskussion von BOKLIM auf diversen Veranstaltungen (z.B. KomPass-Workshop, KBU-Veranstaltung am Tag des Bodens 2010). Die intensive Informations- und Kommunikationsarbeit im BOKLIM-Vorhaben leistete insgesamt einen Beitrag zum Wissenstransfer für die Datenbereitsteller, der Datennutzer und der Entscheidungsträger einerseits und das Kennenlernen der Vorstellungen der Zielgruppen andererseits. Die datenführenden Institutionen wurden als Anlaufstellen in Sachen Bodendaten besser bekannt und es wurde Feedback zu Bewertungen und Empfehlungen eingeholt. Diese Arbeit gilt es fortzusetzen bzw. zu intensivieren. Der vorliegende Bericht enthält Empfehlungen, wie z.B. die Einrichtung eines ständigen Koordinierungsgremiums, und Maßnahmen, die die Vernetzung weiter ausbauen und vertiefen.

Darüber hinaus liegt ein Konzept zur effizienten Bereitstellung und -nutzung von Bodendaten vor. Das Projekt liefert wichtige konzeptionelle Ansätze zur künftigen Vernetzung von Bodendaten auf Bundes- und Länderebene. Es werden Möglichkeiten für konkrete erste Arbeitsschritte und langfristige Perspektiven aufgezeigt, die sich an den rechtlichen Anforderungen der INSPIRE-Richtlinie und des Geodatenzugangsgesetzes, den aktuellen technischen Anforderungen und Standards sowie organisatorischen Randbedingungen orientieren. Die Empfehlungen zur Datenbereitstellung decken Anforderungen klimarelevanter Fragen ab, enthalten jedoch viele themenunabhängige Aspekte, die z.B. für den Bodenschutz oder die Biodiversitätsstrategie aufgegriffen werden können. Im Rahmen eines Fachnetzwerkes Boden, das sich aus Vertretern der beteiligten Ressorts (BMU, BMWi, BMELV, BMVBS) zusammensetzt, sollten weitere Schritte ins Leben gerufen, konkretisiert und in die Umsetzung gebracht werden.

Die Handlungsempfehlungen sollten in einem nächsten Schritt durch die zuständigen Behörden priorisiert und konkretisiert werden. Ohne eine Umsetzung dieser Schritte ist nicht sichergestellt, dass künftig die erforderlichen belastbaren und auswertbaren Daten für die Fragen von Klimawandel und Anpassung zur Verfügung stehen.

Durch eine Integration der Messnetze Boden-Dauerbeobachtung, ICP Forest Level I / Bodenzustandserhebung Wald, ICP Forest Level II, Bodenzustandserhebung Landwirtschaft für die Klimaberichterstattung und Landwirtschaftliche Dauerfeldversuche in die zu bearbeiteten Fachthemen sowie durch eine Vernetzung klima-, boden- und bewirtschaftungsrelevanter langfristiger Prozessstudien von Universitäten und Forschungseinrichtungen können die Anforderungen der Klimafolgenforschung im Bereich der Wirkungs- und Prozesskontrolle erfüllt werden.

Mit den Ergebnissen des BOKLIM-Vorhabens wird der Weg hin zu einem verstärkten Einsatz von Bodendaten in der Klimafolgen- und –anpassungsforschung, einer hinreichenden Vernetzung der Instrumente von Bodenzustandserhebung und Bodenmonitoring und einem besseren Datenzugang aufgezeigt. Wichtige Teilziele, wie die Bereitstellung von konkreten Handlungsempfehlungen und Informationsangeboten zu Bodendaten sowie die Bildung erster Netzwerke wurden erreicht. Um die mit dem Vorhaben angestrebten Ziele langfristig zu erreichen, ist der Weg konsequent weiterzuverfolgen. Aus der Umsetzung der Handlungsempfehlungen ergibt sich folgender Nutzen:

- Steigerung der Nachfrage nach Boden(überwachungs)daten und daraus ableitbaren Aussagen und damit Wertsteigerung von Messprogrammen;
- Herstellung neuer Kommunikationswege und -verbünde zwischen verschiedenen Instituten und Ressorts (Netzwerk-Bildung);
- Erhöhung der Akzeptanz von Erhebungs- und Monitoringaktivitäten sowie Bodenkartierungen;
- Synergieeffekte durch die Bündelung von Überwachungsaktivitäten;
- Erleichterung der Datenvernetzung auf nationaler und europäischer Ebene;
- Erhöhung der Aussagekraft von Klimamodellen oder von in der Klimafolgen- und -anpassungsforschung eingesetzten Wasserhaushalts- oder Stoffflussmodellen durch die Bereitstellung hochwertiger Eingangs- oder Validierungsdaten.

8 LITERATUR

1. Abrams, M. M.; Jarrell, W. M. — Soil phosphorus as a potential nonpoint source for elevated stream phosphorus level. J. Environ. Qual. 24 (1995), S. 132–138

2. Abramyan, S.A. — Variation of Enzyme Activity of Soil under the Influence of Natural and Anthropogenic Factors. Eurasian Soil Science 25 (1993) S. 57-74

3. Acosta-Martínez, V.; Cruz, L.; Sotomayor-Ramírez, D.; Pérez-Alegría, L. — Enzyme activities as affected by soil properties and land use in a tropical watershed. Applied Soil Ecology 35 (2007) S. 35-45.

4. Ad-hoc-AG Boden (2000) — Methodendokumentation Bodenkunde – Auswertungsmethoden zur Beurteilung der Empfindlichkeit und Belastbarkeit von Böden. Geologisches Jahrbuch Sonderhefte, Heft SG 1. Hannover (2000)

5. ahu AG (Hrsg.) — Mess- und Erhebungsaktivitäten für Böden in Deutschland - Bodendaten für Fragen zu Klimawandel, Klimafolgen und Anpassung. 31. August 2009 (1. Entwurf)

6. AK Architektur der GDI-DE: — Architektur der Geodateninfrastruktur Deutschland. Version 1.0. Technisches Konzept zur fach- und ebenenübergreifenden Bereitstellung von Geodaten im Rahmen des E-Government in Deutschland. Geschäfts- und Koordinierungsstelle GDI-De, Frankfurt/M., in Zusammenarbeit mit Conterra GmbH, Münster (2007) (unveröffentlicht)

7. Aksoy, H., and M.L. Kavvas — A review of hillslope and watershed scale erosion and sediment transport models. Catena 64 (2005), S. 247-271

8.	Alef, K.	Methodenhandbuch Bodenmikrobiologie. Aktivitäten, Biomasse, Differenzierung. ecomed Landsberg. (1991), 284 S.
9.	Alexandersson, H.; Tuomenvirta, H.; Schmith, T. and Iden K.	Trends of storms in NW Europe derived from an updated pressure data set, Climate Research 14, 1 (2000), S. 71-73
10.	Angenendt, E.; Billen, N.; Gaiser, T.; Triebe, S.; Stahr, K.; Zeddies, J.	Bewertung von Strategien zur Vermeidung von CO_2-Emissionen aus der landwirtschaftlichen Nutzung in Baden-Württemberg. Forschungsbericht FZKA-BW-PLUS, Förderkennzeichen: BWK 24001. Hohenheim (2007)
11.	Arbeitskreis KLIWA (AK KLIWA)	KLIWA-Symposium von 29./30.11.2000 http://www.kliwa.de/index.php?pos=ergebnisse/berichte/symwork/2000/ [29.04.2009]
12.	Augustin, J.	Einfluß des Grundwasserstandes auf die Emission von klimarelevanten Spurengasen und die C- und N-Umsetzungsprozesse in nordostdeutschen Niedermooren. – In: Landesamt für Umwelt, Naturschutz und Geologie Mecklenburg-Vorpommern (Hrsg.): Stoffausträge aus wiedervernässten Niedermooren. Material zur Umwelt heft 1/2003: Güstrow. S. 38-54
13.	BAFU – Bundesamt für Umwelt, Schweiz	FAQ: Häufig gestellte Fragen zur Bodenbeobachtung. http://www.bafu.admin.ch/boden/00972/04883/index.html?lang=de#sprungmarke0_37 (2007)
14.	Baritz et al. (GS SOIL)	D4.1 Theme specific test cases for developing data specifications for spatial soil information. (2010).

15. Baritz, R.; Eberhardt, E.; Van Liederkerke, M.H.; Panagos, P. (eds) — Environmental Assessment of Soil for Monitoring. Volume III Data base design and selection. JRC Scientific and Technical Reports EUR 23490 EN/3 – 2008. Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg, (2008) 125 S.

16. Baritz, R.; Eberhardt, E.; Van Liederkerke, M.H.; Panagos, P. (eds) — Environmental Assessment of Soil for Monitoring. Volume III: Data base design and selection. JRC Scientific and Technical Reports EUR 23490 EN/3 – 2008. Office for Official Publications of the European Communiuties, Luxembourg, 125pp. ISBN 978-92-79-09711-9 (2008)

17. Barring, L.; Jonsson P., Mattsson J.O.; and Ahman R. — Wind erosion on arable land in Scania, Sweden and the relation to the wind climate - a review. Catena 52 (2003), S. 173-190

18. Barrios, E. — Soil biota, ecosystem services and land productivity. Ecological economics 64 (2007), S. 269-285

19. Barth, N., Brandtner, W., Cordsen, E., Dann, T., Emmerich, K.-H., Feldhaus, D., Kleefisch, B., Schilling, B. & Utermann, J. — Boden-Dauerbeobachtung. Einrichtung und Betrieb von Boden-Dauerbeobachtungsflächen.- In: Rosenkranz, D., Bachmann, G., König, W., Einsele, G. (Hrsg.): Bodenschutz – Ergänzbares Handbuch der Maßnahmen und Empfehlungen für Schutz, Pflege und Sanierung von Böden, Landschaft und Grundwasser - Lose-Blatt-Sammlung, Erich Schmidt Verlag. (2001)

20. Barth, N., Brandtner, W., Cordsen, E., Dann, T., Emmerich, K-H., Feldhaus, D., Kleefisch, B., Schilling, B., Utermann, J. — Permanent Soil Monitoring Installation and Operation of Soil monitoring Sites. Permanent Monitoring 9152. (2001)

21. Barth, N.; Brandtner, W.; Cordsen, E.; Dann, T.; Emmerich, K.-H.; Feldhaus, D.; Kleefisch, B.; Schilling, B.; Utermann, J. — Boden-Dauerbeobachtung – Einrichtung und Betrieb von Boden-Dauerbeobachtungsflächen. In: Rosenkranz, D.; Bachmann, G.; König, W.; Einsele, G. (Hrsg.): Bodenschutz. Kennziffer 9152, Erich Schmidt Verlag, Berlin (2000), 127 S.

22. Barth, N.; Forberg, H. (2008) — Abbildung von Klimaereignissen in Messungen des Bodenmonitorings. In: Umweltbundesamt (Hrsg.): UBA-Workshop „Böden im Klimawandel – Was tun?!“ am 22./23. Januar 2008, Dessau-Roßlau (2008), S. 245-261

23. Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU) — Klimawandel und Boden. Referat 108 Vorsorgender Bodenschutz, Augsburg (2007), 10 S.

24. BBodSchG – Bundes-Bodenschutzgesetz — Gesetz zum Schutz vor schädlichen Bodenveränderungen und zur Sanierung von Altlasten, vom 17. März 1998, BGBl. I S. 502, zuletzt geändert am 9. Dezember 2004, BGBl. I S. 3214

25. Beauchemin, S., Simard, R. R., Cluis, D. — Forms and concentration of phosphorus in drainage water of 27 tile-drained soils. J. Environ. Qual. 27 (1998), S. 721–728

26. Behrendt, H., Boekhold, A. — Phosphorus saturation in soils and groundwaters. Land Degr. Rehab. 4 (1993), S.233–243

27. Bellamy, P.H., P.J. Loveland, R.I. Bradley, R.M. Lark, and G.J.D. Kirk — Carbon losses from all soils across England and Wales 1978-2003. Nature 437 (2005), S.245-248

28. Beylich, A.; Broll, G.; Graefe, U.; Höper, H.; Römbke, J.; Ruf, A.; Wilke, B.-M. — Biologische Charakterisierung von Böden. Ansatz zur Bewertung des Bodens als Lebensraum für Bodenorganismen im Rahmen von Planungsprozessen. BVB-Materialien, Band 13 (2005), 78 S.

29. Bingner, R. L., Czajkowski, K., Palmer, M., Coss, J., Davis, S., Stafford, J., Widman, N., Theurer, F.D., Koltun, G., Richards, P. and T. Friona — Upper Auglaize Watershed AGNPS Modeling Project Final Report. Research Report No. 51. US Department of Agriculture, Agricultural Research Service, National Sedimentation Laboratory, Oxford, MS (2006)

30. BioSt-NachV — Biomassestrom-Nachhaltigkeitsverordnung vom 23. Juli 2009 (BGBl. I S. 2174).

31. Blume, H.; Müller-Thomsen, U. — A field experiment on the influence of the postulated global climatic change on coastal marshland soils. Journal of Plant Nutrition and Soil Science 170, 1 (2007), S. 145-172

32. Blume, H.-P.; Brümmer, G.W.; Schwertmann, U.; Horn, R.; Kögel-Knabner, I.; Stahr, K.; Auerswald, K.; Beyer, L., Hartmann, A.; Litz, N.; Scheinost, A.; Stanjek, H. Welp, G.; Wilke, B.-M. — Lehrbuch der Bodenkunde (Scheffer/Schachtschabel). 15. Auflage, Spektrum Akademischer Verlag GmbH, Heidelberg Berlin (2002)

33. Blume, H.-P.; Deller, B.; Leschber, R.; Paetz, A.; Schmidt, S.; Wilke, B.-M. — Handbuch der Bodenuntersuchung, Beuth-Verlag, (2010)

34. BMELV - Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz — Handbuch Forstliche Analytik. Loseblatt-Sammlung der Analysemethoden im Forstbereich. Hrsg.: Gutachterausschuss Forstliche Analytik (2007)

35. BMU (Hrsg.) — Nationale Strategie zur biologischen Vielfalt (vom Bundeskabinett am 7.11.2007 beschlossen). Reihe Umweltpolitik (2007), 178 S.

36. Boardman, J. — An average soil erosion rate for Europe: myth or reality? Journal of Soil and Water Conservation 53, 1 (1998), S. 46– 50.

37. Böhner, J., Gross, J. and M.J.P.M. Riksen — Impact of land use and climate change on wind erosion: Prediction of wind erosion activity for various land use and climate scenarios using the WEELS wind erosion model Published in: Wind Erosion and Dust Dynamics: Observations, Simulations, Modelling (Eds. D. Goossens and M.J.P.M. Riksen). ESW, Wageningen University, Wageningen (2004), S. 103-121

38. Borken, W.; Matzner, E. — Reappraisal of drying and wetting effects on C and N mineralization and fluxes in soils. Global Change Biology 15 (2009), S. 808-824

39. BOVA Redaktionsgruppe „BDF/Humus/Klima“ — Konzeption zur länderübergreifenden Bearbeitung der Thematik "Veränderung der Humusgehalte / Klimawandel" im Rahmen der Boden-Dauerbeobachtung". Stand: 10.02.2010, unveröffentlichter Entwurf.

40. BOVA Redaktionsgruppe „Boden-Dauerbeobachtung“ — Boden-Dauerbeobachtung als eine Grundlage für den vorsorgenden Bodenschutz. Stand: 03.06.2008, unveröffentlichter Entwurf

41. BOVA Ständiger Ausschuss Vorsorgender Bodenschutz der LABO — Themenkarten des Bundes und der Länder. Stand: Oktober 2006. [enthalten in Umweltbundesamt 2009: Mess- und Erhebungsaktivitäten für Böden in Deutschland]

42. BOVA Ständiger Ausschuss Vorsorgender Bodenschutz der LABO — Boden-Dauerbeobachtung als eine Grundlage für den vorsorgenden Bodenschutz. Bericht der Redaktionsgruppe „Boden-Dauerbeobachtung“ des Ständigen Ausschusses 2 (Vorsorge) an die LABO. Stand 3.6.2008 81.S. (2008)

43.	BOVA Ständiger Ausschuss Vorsorgender Bodenschutz der LABO	Boden-Dauerbeobachtung – Konkretisierung der prioritären, länderübergreifenden Fragestellung „Veränderung der Humusgehalte / Klimawandel“. Beschlussprotokoll der 9. Sitzung am 22./23.06.2009 in Langenargen: Bericht zu TOP 5.3 (2009)
44.	BOVA-Sitzung	Anlage 2 zu TOP 6.1 der 8. BOVA-Sitzung am 26./27.01.2009
45.	Boyer, J.N.; Groffman, P.M.	Bioavailability of water extractable organic carbon fractions in forest and agricultural soil profiles. Soil Biology and Biochemistry 28, 6 (1996), S. 783-790
46.	Brady, N.C., Weil, R.R.	The Nature and Property of Soils. 12. Auflage (1999). Prentice Hall
47.	Bräunig, A., Klöcking, B.	Auswirkungen von Klimaänderungen auf den Bodenwasserhaushalt in Sachsen. In: Umweltbundesamt (Hrsg.) (2008): UBA-Workshop „Böden im Klimawandel – Was tun?!“ am 22./23. Januar 2008, Dessau-Roßlau, S. 27-36
48.	Brazier, R.	Quantifying soil erosion by water in the UK: a review of monitoring and modelling approaches Progress in Physical Geography Volume 28, 3 (2004), S. 340–365
49.	Bremner, J.M.	Sources of nitrous oxide in soils. Nutrient Cycling in Agroecosystems 49 (1997), S. 7-16
50.	Bridgham, S.D., Johnston, C.A., Pastor, J., Updegraff, K.	Potential Feedbacks of Northern Wetlands on Climate-Change - an Outline of an Approach to Predict Climate-Change Impact. Bioscience 45 (1995), S. 262-274
51.	Broll, G.; Brauckmann, H.-J.; Overesch, M.; Junge, B.; Erber, C.; Milbert, G.; Baize, D.; Nachtergaele, F.	Topsoil characterization – recommendations for revision and expansion of the FAO-Draft (1998) with emphasis on humus forms and biological features. J. Plant Nutr. Soil Sci. 169 (2006), S. 453-461

52.	Bund-/Länderarbeitsgemeinschaft Bodenschutz (BU-/LABO)	Klima, Energie, Mobilität- Nachhaltigkeit (2008)
53.	Bund-/Länderarbeits-gemeinschaft Bodenschutz (BU-/LABO)	8. BOVA-Sitzung 26./27.01.2009, Anlage 2 zu TOP 6.1 Auswirkungen des Klimawandels auf den Boden, Forschungsvorhaben der Länder, Stand: 08.01.2009
54.	Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (BMELV)	Zielsetzung und Konzeption der zweiten Bodenzustandserhebung im Wald (BZE II-Konzeptpapier). Bund-Länder-Arbeitsgruppe „BZE II“ – Konzeptpapier, beschlossen am 5./6. April 2005 in Gotha und mit der BZE II-Arbeitsanleitung abgeglichen (Stand: Jan. 2007)
55.	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU)	Grundwasser in Deutschland. Berlin (2008b), 72 S.
56.	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU)	Dem Klimawandel begegnen. Die Deutsche Anpassungsstrategie. Berlin (2009)
57.	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU)	BMU-Konferenz „Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel“ am 15./16.4.2008 im Berlin – Handout Workshop „Landwirtschaft/Bodenschutz/Biodiversität“. Berlin (2008)
58.	Bundesministerium für Verbraucherschutz Ernährung Landwirtschaft und Forsten (BMVEL)	Bericht zum Klimaschutz im Bereich Land- und Forstwirtschaft. BMVEL, Berlin (2005)
59.	Bundesregierung	Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel, Berlin (2008)

60. Bundesverband Boden e.V. (BVB) — Böden und Schadstoffe Bedeutung von Bodeneigenschaften bei stofflichen Belastungen. BVB-Materialien, Erich Schmidt Verlag, Berlin (2000)

61. Büro für Angewandte Hydrologie (BAH) — http://www.bah-berlin.de/ html/arcegmo. Html (25.03.2009)

62. Burton D.L. und Beauchamp, E.G. — Profile nitrous oxide and carbon dioxide concentrations in a soil subjected to freezing. Soil Sci. Soc. Am. J. 58 (1994), S. 115-122

63. Butterbach-Bahl, K., M. Kock, G. Willibald, B. Hewett, S. Buhagiar, H. Papen, and R. Kiese — Temporal variations of fluxes of NO, NO2, N2O, CO2 and CH4 in a tropical rain forest ecosystem, Global Biogeochem. Cycles 18 (2004)

64. BVB — Bodenerosion durch Wasser: Bewertungsmethodik und Instrumente der Deutschen Bundesländer, Bundesverband Boden, Band 14, Erich Schmidt Verlag (2006) , 151 Seiten

65. Carretero, J.C. et al. — Changing waves and storms in the northeast Atlantic? Bulletin of the American Meteorological Society 79, 5 (1998), S. 741-760

66. Chandler, K; Brookes, P.C. — Effects of heavy metals from past applications of sewage sludge on microbial biomass and organic matter accumulation in a sandy loam and a silty loam UK soil. Soil Biology & Biochemistry 23 (1991), S. 927-932

67. Chapuis-Lardy, L., Wrage, N., Metay, A., Chotte, J.L., Bernoux. B. — Soils, a sink for N2O? A review. Global Change Biology 13 (2007), S. 1-17.

68. Chmielewski, F.-M. — Folgen des Klimawandels für Land- und Forstwirtschaft. In: Endlicher, W.; Gerstengarbe, F.-W. (Hrsg.) (2007): Der Klimawandel – Einblicke, Rückblicke und Ausblicke. Potsdam (2007), 134 S. , S. 75-85

69. Christensen, T. R., Ekberg, A., Ström, L., Mastepanov, M. Panikov, N., Öquist, M., Svensson, B. H., Nykänen, H., Martikainen, P. J., Oskarsson, H. — Factors controlling large scale variations in methane emissions from wetlands. Geophys. Res. Lett., 30, 7, 1414 (2003).

70. Cole, L.; Bradford, M.A.; Shaw, P.J.A.; Bardgett, R.D. — The abundance, richness and functional role of soil meso- and macrofauna in temperate grassland—A case study. Applied Soil Ecology 33 (2006), S. 186–198.

71. Coleman, K.; Jenkinson, D.S. — The Rothamsted Carbon Model. (1999) www.aglearn.net/resources/isfm/THE%20ROTHAMSTED%20CARBON%20MODEL.pdf [03.06.2009]

72. COM/2008/0046 final — Mitteilung der Kommission an den Rat, das europäische Parlament, den europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss and den Ausschuss der Regionen. Hin zu einem gemeinsamen Umweltinformationssystem (SEIS). http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do-?uri=CELEX:52008DC0046:EN:NOT (2008).

73. COM/2008/0046 final: — Mitteilung der Kommission an den Rat, das europäische Parlament, den europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss and den Ausschuss der Regionen. Hin zu einem gemeinsamen Umweltinformationssystem (SEIS) (2008). http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do-?uri=CELEX:52008DC0046:EN:NOT

74. Conrad, R. — Microbiological and biochemical background of production and consumption of NO and N2O in soil, in Trace Gas Exchange in Forest Ecosystems, edited by R. Gasche, H. Papen, and H. Rennenberg, Springer, New York (2002) S. 3–33

75. CONSIDER (Conservation of Soil Organism Diversity under Global Change) — Fourth periodic report, deliverable 48. Thematic network CONSIDER (EVK2-CT-2002-20012). 22 S.

76. Cox, J. W., Varcoe, J., Chittleborough, D. J., van Leeuwen, J. — Using gypsum to reduce phosphorus in runoff from subcatchments in south Australia. J. Environ. Qual. 34 (2005), S. 2118–2128

77. Davidson, E. A., Keller, M. Erickson, H. E., Verchot, L. V., Veldkamp, E. — Testing a conceptual model of soil emissions of nitrous oxides, BioScience 8 (2000), S. 667–680

78. Davidson, E.A.; Janssens, I.A. — Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feed-backs to climate change. Nature 440, 9 (2006), S. 165-173

79. de Vente, J. and ,J. Poesen — Predicting soil erosion and sediment yield at the basin scale: Scale issues and semi-quantitative models. Earth-Science Reviews 71 (2005), S. 95-125

80. Delschen, T.; Hembrock-Heger, A.; Leisner-Saaber, J.; Sopczak, D. — Verhalten von PAK im System Boden/Pflanze. Zeitschrift für Umweltchemie und Ökotoxikologie 11, 2 (1999), S. 79-87

81. Deutsche Bundesregierung — Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel, vom Bundeskabinett am 17. Dezember 2008 beschlossen. Kabinettsbericht und Hintergrundpapier. (2008)

82. Deutsche Bundesregierung — Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel, vom Bundeskabinett am 17. Dezember 2008 beschlossen. http://www.bmu.de/klimaschutz/downloads/doc/42783.php

83. Díaz-Raviña M.; Acea, M.J.; Carballas, T. — Seasonal fluctuations in microbial populations and available nutrients in forest soils. Biology and Fertility of Soils. 16 (1993), S. 205-210

84. Dietrich, A. — Die Rolle von Bodenenzymen als Indikator für landwirtschaftliches Management. Fachabteilung für Hydrologie und Wasserwirtschaft der Christian-Albrechts-Universität Kiel, Seminar Wasserwirtschaft WS 05/06 (2005)

85. DirektZahlVerpflG — Direktzahlungen-Verpflichtungengesetz in der Fassung der Bekanntmachung vom 28. April 2010 (BGBl. I S. 588)

86. DirektZahlVerpflV — Direktzahlungen-Verpflichtungenverordnung vom 4. November 2004 (BGBl. I S. 2778), die zuletzt durch die Verordnung vom 20. April 2010 geändert worden ist

87. Djodjic, F., Börling, K., Bergström, L. — Phosphorus leaching in relation to soil type and soil phosphorus content. J. Environ. Qual. 33 (2004), S. 678–684

88. Dobbertin, M.; Giuggiola, A. — Baumwachstum und erhöhte Temperaturen. In: Wald und Klimawandel, Forum für Wissen (2006), S.35-45

89. Doleschel, P. & A. Heißenhuber — Externe Kosten der Bodenerosion. Landw. Jahrbuch 68 Jahrg.-H2/91 (1991)

90. Doms, G., J. Förstner, E. Heise, H.-J. Herzog, M. Raschendorfer, R. Schrodin, T. Reinhardt & G. Vogel — A description of the nonhydrostatic regional model LM. Part II: Physical parameterization. Deutscher Wetterdienst, verfügbar unter: www.cosmo-model.org. (2005).

91. Donaubauer, A.; Fichtinger, A.; Schilcher, M.; Straub, F.; Carosio, A.; Gnägi, H.R.; Staub, P.: — Grenzüberschreitende Web-GIS Lösungen. (2006) GIS 9 S. 29-34

92. Donaubauer, A.; Fichtinger, A.; Schilcher, M.; Straub, F.; Carosio, A.; Gnägi, H.R.; Staub, P. — Grenzüberschreitende Web-GIS Lösungen. GIS 9: 29-34. (2006)

93. Drösler, M. — Trace gas exchange and climatic relevance of bog ecosystems, Southern Germany. Dissertation, TU – München (2005)

94. Du Laing, G.; Chapagain, S.K.; Dewispelaere, M.; Meers, E.; Kazama, F.; Tack, F.M.G; Rinklebe, J.; Verloo, M.G. — Presence and mobility of arsenic in estuarine wetland soils of the Scheldt estuary (Belgium). J. Environ. Monit. 11 (2009a), S. 873-881

95. Du Laing, G.; Rinklebe, J.; Vandecasteele, B.; Meers, E.; Tack, F.M.G. (2009b) — Trace metal behaviour in estuarine and riverine floodplain soils and sediments: A review. Science of the Total Environment 407 (2009b), S. 3972-3985

96. Dunfield, P., Knowles R., Dumont, R. and Moore, T. R. — Methane production and consumption in temperate and subarcticpeat soils – Response to temperature and pH. Soil Biol. Biochem. 25 (1993), S. 321–326

97. During, A.; Rinklebe, J.; Böhme, F.; Wennrich, R.; Stärk, H.-J.; Mothes, S.; Du Laing, G.; Schulz, E.; Neue, H.-U. (2009) — Mercury Volatilization from Three Floodplain Soils at the Central Elbe River (Germany). Soil and Sediment Contamination: An International Journal 18, 4 (2009), S. 429-444

98. Düwel, O. — Die Bedeutung der Bodenrauhigkeit für die Bodenerosion durch Wind – Ein Beitrag zur Quantifizierung der Bodenverluste. Geol. Jahrbuch Sonderhefte, Reihe F, Heft SF 1, Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart (2000)

99. Düwel, O. and J. Utermann — Indicators of Soil Erosion at the ETC/Soil. In: Gobin, A., Govers, G., Jones, R., Kirkby, M and C. Kosmas: Assessment and reporting on Soil Erosion. EEA, Copenhagen (2003)

100. Duxbury, J.M. — The Significance of Agricultural Sources of Greenhouse Gases. Fertilizer Research 38 (1994), S. 151-163.

101. DVWK — Gefügestabilität ackerbaulich genutzter Mineralböden. Teil I: Mechanische Belastbarkeit. – DVWK-Merkblatt zur Wasserwirtschaft, H. 234; Bonn (1995)

102. DVWK — Bodenerosion durch Wasser – Kartieranleitung zur Erfassung aktueller Erosionsformen. DVWK-Merkblätter, 239, Bonn (1998)

103. EC — Verordnung (EG) Nr. 1205/2008 der Kommission vom 3. Dezember 2008 zur Durchführung der Richtlinie 2007/2/EG des Europäischen Parlaments und des Rates hinsichtlich Metadaten.

104. EC JRC — INSPIRE Metadata Implementing Rules: Technical Guidelines based on EN ISO 19115 and EN ISO 19119. (2009)

105. EFSA — The usefulness of total concentrations and pore water concentrations of pesticides in soil as metrics for the assessment of ecotoxicological effects. Scientific Opinion of the Panel on Plant Protection Products and their Residues (PPR). The EFSA Journal 922 (2009), S. 1-90

106. Egli, M., Sartori, G. Mirabella, A., Favilli, F., Giaccai, D., Delbos, F. — Effect of north and south exposure on organic matter in high Alpine soils. Geoderma 149 (2009), S. 124-136.

107. Ekschmitt, K.; Stierhof, T.; Dauber, J.; Kreimes. K.; Wolters, V. — On the quality of soil biodiversity indicators: abiotic and biotic parameters as predictors of soil faunal richness at different spatial scales. Agriculture, Ecosystems and Environment 98 (2003), S. 273-283

108. Ellmer, F. — Dauerfeldversuche in Deutschland – Übersicht und Forschungspotentiale. In: Umweltbundesamt (Hrsg.) (2008): UBA-Workshop „Böden im Klimawandel – Was tun?!“ am 22./23. Januar 2008, Dessau-Roßlau, S. 225-234

109. Eppink, L.A.A.J. — A survey of wind and water erosion in the Netherlands and an inventory of Dutch erosion research. Rep. Dept. of Land and Water Use No. 59. Agricultural University of Wageningen (1982)

110. Ernst, G.; Emmerling, C. — Impact of five different tillage systems on soil organic carbon content and the density, biomass and community composition of earthworms after a ten-year period. European Journal of Soil Biology (2009)

111. EU Commission — Verordnung (EG) Nr. 1205/2008 der Kommission vom 3. Dezember 2008 zur Durchführung der Richtlinie 2007/2/EG des Europäischen Parlaments und des Rates hinsichtlich Metadaten (1), Amtsblatt der Europäischen Union ISSN 1725-2539 L 326, 51. Jahrgang, 4. Dezember 2008 http://eur-lex.europa.eu/JOHtml.do?uri=OJ:L:2008:326:SOM:DE:HTML. (2008).

112. EU JRC — INSPIRE Metadata Implementing Rules: Technical Guidelines based on EN ISO 19115 and EN ISO 19119, Version 1.1, 18.02.2009. Drafting Team Metadata and European Commission Joint Research Centre. (2009).

113. EU JRC, INSPIRE Metadata Implenting Rules — Technical Guidelines based on EN ISO 19115 and EN ISO 19119, Version 1.1, 18.02.2009. Drafting Team Metadata and European Commission Joint Research Centre (2009)

114. Europa – Press Releases Rapid — Umwelt: Kommission richtet hochrangige Konferenz über Böden und Klimawandel aus. http://europa.eu/rapid/pressReleasesAction.do?reference=IP/08/924&format=HTML&aged=0&language=DE&guiLanguage=en (23.03.2009)

115. Europäische Union (EU) — Umwelt: Kommission richtet hochrangige Konferenz über Böden und Klimawandel aus. (2008)

116. Europäisches Parlament — Richtlinie 2007/2/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 14. März 2007 zur Schaffung einer Geodateninfrastruktur in der Europäischen Gemeinschaft (INSPIRE), Amtsblatt der Europäischen Union ISSN 1725-2539 L 108, 50. Jahrgang, 25. April 2007. (2007).

117. European Commission: — Landwirtschaft, Umwelt, ländliche Entwicklung: Zahlen und Fakten. (2009) http://ec.europa.eu/agriculture/envir/report/de/clima_de/report.htm

118. Evans, R. — Some Methods of Directly Assessing Water Erosion of Cultivated Land – a Comparison of Measurements Made on Plots and in Fields. Progress in Physical Geography 19 (1195), S. 115-129

119. Falloon, P.and R. Betts — Climate impacts on European agriculture and water management in the context of adaptation and mitigation – The importance of an integrated approach. Science of the Total Environment (2009) (im Druck)

120. Fang, C.M., Smith, P., Moncrieff, J.B., Smith J.U. — Similar response of labile and resistant soil organic matter pools to changes in temperature. Nature 433 (2005), S. 57-59

121. Favis-Mortlock, D. — Validation of field-scale soil erosion models using common datasets. Modelling Soil Erosion by Water 55 (1998), S. 89-127

122. Favis-Mortlock, D., and J. Boardman — Nonlinear Responses of Soil-Erosion to Climate-Change – a Modelling Study on the UK South-Downs. Catena 25 (1995), S. 365-387

123. Favis-Mortlock, D., and S.J.T. Guerra — The implications of general circulation model estimates of rainfall for future erosion: a case study from Brazil. Catena 37 (1999), S. 329-354

124. Feher, D. — Untersuchungen über den zeitlichen Verlauf der Bodenatmung und der Mikrobentätigkeit des Waldbodens. Biochemische Zeitschrift 206 (1927), S. 416-435

125. Feher, D.; Frank, M. — Experimentelle Untersuchungen über den Einfluß der Temperatur und des Wassergehaltes auf die Tätigkeiten der Mikroorganismen des Bodens. Archiv für Mikrobiologie 8 (1937), S. 249-287

126. Feher, D.; Frank, M. — Untersuchungen über den Einfluß der Temperatur und des Wassergehaltes auf die Tätigkeit der Mikroorganismen des Bodens. II. Mitt. Archiv für Mikrobiologie 9 (1938), S. 193-222

127. Feichtinger, F. — Regionale Modellierung des Wasser- und Stoffkreislaufes. In: Seminar „Wasserkreislaufparameter“ vom 31.3. bis 1.4.2008 im Schloss Seggau bei Leibnitz (2008), S. 51-54

128. Feldhaus, D. — Interaktion und Synergien zwischen der Klimafolgenschätzung und laufenden Programmen und Analysen in Sachsen-Anhalt. In: Umweltbundesamt (Hrsg.) (2008): UBA-Workshop „Böden im Klimawandel – Was tun?!“ am 22./23. Januar 2008, Dessau-Roßlau (2008), S. 173-179

129. FFH-Richtlinie — Richtlinie 92/43/EWG des Rates vom 21.05.1992 zur Erhaltung der natürlichen Lebensräume sowie der wildlebenden Tiere und Pflanzen, zuletzt geändert durch Richtlinie 97/62/EG des Rates vom 27.10.1997

130. Fiedler, S. — Hydromorphe Böden – Quellen oder Senken klimarelevanter Gase? Bodenschutz im Klimawandel – Nur 2 grad mehr? - WORKSHOP 30.06. – 01.07.2008 in Blockhaus Dresden (2009)

131. Fischer, E.M.; Seneviratne, S.I.; Lüthi, D.; Schär, C. — Contribution of land-atmosphere coupling to recent European summer heat waves. Geophysical Research Letters 34 (2007), L06707

132. Flechard, C.R., Neftel, A., Jocher, M., Ammann, C., Fuhrer, J. — Bi-directional soil/atmosphere N2O exchange over two mown grassland systems with contrasting management practices. Global Change Biology 11 (2005) S. 2114-2127

133. Freibauer, A., Drösler, M., Gensior, A., Schulze, E.-D. — Das Potenzial von Wäldern und Mooren für den Klimaschutz in Deutschland und auf globaler Ebene. Natur und Landschaft 84 (2009), S. 20-25

134. Frey, S.D.; Drijber, R.; Smith, H.; Melillo, J. — Microbial biomass, functional capacity, and community structure after 12 years of soil warming. Soil Biology & Biochemistry 40, 11 (2008), S. 2904-2907

135. Funk, R. und L. Voelker — Einschätzung der potentiellen Winderosionsgefährdung in Mecklenburg-Vorpommern im Landesmaßstab mit der Revised Wind Erosion Equation. Mitt. Dt. Bodenkd. Ges. 88 (1998), S. 557-560

136. Gärdenäs, A.I. — Soil respiration fluxes measured along a hydrological gradient in a Norway spruce stand in south Sweden (Skogaby). Plant and Soil 221 (2000), S. 273-280

137. Gasche, R., Papen, H. — A 3-year continuous record of nitrogen trace gas fluxes from untreated and limed soil of a N-saturated spruce and beech forest ecosystem in Germany – 2. NO and NO2 fluxes. Journal of Geophysical Research-Atmospheres 104 (1999), S. 18505-18520

138. Gaul, D.; Hertel, D.; Leuschner, C. — Effects of experimental soil frost on the fine-root system of mature Norway spruce (S. 690-698), Journal of Plant Nutrition and Soil Science 171, 5 (2008), S. 690-698

139. Gisi, U. — Bodenökologie. 2., neubearbeitete und erweiterte Auflage. Stuttgart: Georg Thieme Verlag (1997), 350S.

140. Gobin, A., R. Jones, M. Kirkby, P. Campling, G. Govers, C. Kosmas, and A.R. Gentile — Indicators for Pan-European assessment and monitoring of soil erosion by water. Environmental Science & Policy 7 (2004), S. 25-38

141. Goldberg, S.D., und Gebauer, G. — Drought turns a Central European Norway spruce forest soil from an N2O source to a transient N2O sink. Global Change Biology 15 (2009), S. 850-860

142. Goossens, D., J. Gross, and W. Spaan — Aeolian dust dynamics in agricultural land areas in lower Saxony, Germany. Earth Surface Processes and Landforms 26 (2001), S. 701-720

143. Grace, J., Rayment, M. — Respiration in the balance. Nature 404 (2000), S. 819-820

144. Graefe, U. — Das vertikale Verteilungsmuster der Kleinringelwurmzönose als Indikator der Prozessdynamik im Humusprofil. Mitt. Dtsch. Bodenkdl. Ges. 103 (2004), S. 27-28

145. Greve, K. und Ch. Kiehle — OGC-Standards der Zukunft. GIS-Business 10: 30-32. (2006).

146. Greve, K. und Ch. Kiehle: OGC-Standards der Zukunft. GIS-Business 10 (2006), S. 30-32

147. Groh Bodenabtrag durch Wassererosion in Folge von Klimaveränderungen: Bodenschutz im Klimawandel – KLIWA – Forschungsvorhaben Baden-Württemberg. (2009)

148. Hädicke, A. Untersuchungsvorhaben zum Humusstatus von Ackerböden in NRW. Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz NRW, Essen (2009)

149. Harden, R.G.; Jörgensen, R.G.; Meyer, B.; Wolters, V. Soil microbial biomass estimated by fumigation-extraction and substrate induced respiration in two pesticide treated soils. Soil Biology & Biochemistry 25 (1993), S. 679-683

150. Hartley, I.P.; Ineson, P. Substrate quality and the temperature sensitivity of soil organic matter decomposition. Soil Biology & Biochemistry 40, 7 (2008), S. 1567-1574

151. He, Q., Walling, D.E. Testing distributed soil erosion and sediment delivery models using 137Cs measurements. Hydrol. Process 17 (2003), S. 901–916

152. Hebel, B. Validierung numerischer Erosionsmodelle in Einzelhang- und Einzugsgebiet-Dimension. Dissertation, Universität Basel (2003), 245 S.

153. Heidkamp, A. Pedotransfer-Funktionen zur Sorption von Schwermetallen in Waldböden (Dissertation). HORIZONTE Herrenhäuser Forschungsbeiträge zur Bodenkunde 18 (2005), 196 S.

154. Hennings, V. — Erosionsgefährdung ackerbaulich genutzter Böden durch Wasser (Karte im Maßstab 1:2.750.000). In: Nationalatlas Bundesrepublik Deutschland, Bd. 2: Relief, Boden und Wasser. Inst. F. Länderkunde [Hrsg.]. Spektrum Akademischer Verlag. Heidelberg – Berlin (2003)

155. Hessisches Ministerium für Umwelt, ländlichen Raum und Verbraucherschutz (HMULV) — Aktionsplan Klimaschutz November 2007. Wiesbaden

156. Hikisch, B.; Müller, G. jun.; Heisig, W. — Einfluss von Witterung und Kulturpflanzenbestand auf bodenbiologische Leistungen. 4. Mitt.: Rangfolgevergleich bei 16 Prüffaktoren im zweiten Anbaujahr der Kulturpflanzen. Zbl. Mikrobiol. 139 (1984), S. 511-517

157. Hinterding, A.; Müller, A.; Gerlach, N.; Gabel, F. — Geostatistische und statistische Methoden und Auswerteverfahren für Geodaten mit Punkt- bzw. Flächenbezug. Abschlussbericht November 2003

158. Holtgrieve, G.W., Jewett, P.K., Matson, P.A. 2006 — Variations in soil N cycling and trace gas emissions in wet tropical forests. Oecologia 146 (2006), S. 584-594.

159. Höper, H. — Freisetzung von Treibhausgasen aus deutschen Mooren. Telema, Berichte der Deutschen Gesellschaft für Moorkunde 37 (2007), S. 85 – 105

160. Horn, R., Lebert, M., Burger, N. — Vorhersage der mechanischen Belastbarkeit von Böden als Pflanzenstandort auf der Grundlage von Labor- und in situ-Messungen. Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen (Hrsg.): Materialien 73 (1991), München

161. Hosenfeld, F.; Rinker, A.; Schnack, K.; Granke, O.; Mues, V. — Informationssystem zum Waldmonitoring in Europa – Datenmanagement im EU-Projekt FutMon. In: Umweltbundesamt (Hrsg.): Umweltinformationssysteme. uba-texte 57/2010 (2010).

162. Huber, U. — Metadaten in der Geoinformatik. Fortbildungsseminar Geoinformationssysteme. 14.-16. März 2001, Technische Universität München, Institut für Geodäsie, GIS und Landmanagement (2001) (unveröffentlicht)

163. Huber, U. — Metadaten in der Geoinformatik. Fortbildungseminar Geoinformationssysteme. 14.-16. März 2001, Technische Universität München, Institut für Geodäsie, GIS und Landmanagement. (unveröffentlicht). (2001):

164. Ilstedt, U.; Nordgren, A.; Malmer, A. — Optimum soil water for soil respiration before and after amendment with glucose in humid tropical acrisols and a boreal mor layer. Soil Biology and Biochemistry 32 (2000), S. 1591-1599

165. Insam, H. — Are the soil microbial biomass and basal respiration governed by the climate regime? Soil Biology and Biochemistry 22, 4 (1990), S. 525-532

166. IPCC — Climate Change 2007: Synthesis Report. An Assessment of the Intergovernmental Panel on Climate Change (2007)

167. ISO (International Organization for Standardization) — Soil quality – Sampling of soil invertebrates – Part 1: Hand-sorting and formalin extraction of earthworms. ISO 23611-1:2006. Geneve, Switzerland (2006a)

168. ISO (International Organization for Standardization) — Soil quality – Sampling of soil invertebrates Part 2: Sampling and extraction of microarthropods (Collembola and Acarina). ISO 23611-2. Geneve, Switzerland (2006b)

169. ISO (International Organization for Standardization) — Soil quality – Sampling of soil invertebrates Part 3: Sampling and extraction of enchytraeids. ISO 23611-3. Geneve, Switzerland (2007)

170. Jacobeit, J. — Zusammenhänge und Wechselwirkungen im Klimasystem. In: Endlicher, W.; Gerstengarbe, F.-W. (Hrsg.): Der Klimawandel – Einblicke, Rückblicke und Ausblicke, Potsdam (2007) S. 1-16, 134

171. Jenkinson, D.S. — The turnover of organic carbon and nitrogen in soil. Phil. Trans. R. Soc. B 329 (1990), S. 361–368

172. Jenkinson, D.S.; Adams, D.E.; Wild, A. — Model estimates of CO2 emissions from soil in response to global warming. Nature 351 (1991), S. 204-306

173. Jessel, B. — Biodiversität und Klimawandel – Forschungsbedarfe im Rahmen nationaler Handlungsstrategien. Natur & Landschaft 84, 1 (2009), S. 32-38

174. Jetten, V., A. de Roo, and D. Favis-Mortlock — Evaluation of field-scale and catchment-scale soil erosion models. Catena 37 (1999), S. 521-541

175. Johanssson, K.; Iverfeldt, Å. — THE relation between mercury content in soil and the transport of mercury from small catchments in Sweden. In: Watrs, C.J., Huckabee, J.W. (Hrsg.): Mercury pollution – integration and synthesis. Lewis Publishers, Boca Raton (1994), S. 323-328

176. Jordan, F., Müller, Ch., Holleis, P. — Oberflächenabfluss, Boden- und Nährstoffaustrag von ackerbaulich genutzten Flächen. Agrarökologie, Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (2004)

177. Jörgensen, R.G. — Die quantitative Bestimmung der mikrobiellen Biomasse in Böden mit der Chloroform-Fumigations-Extraktions-Methode. Habil. Schrift. Göttinger Bodenkundliche Berichte 104 (1995), S. 1-229.

178. Kaiser, E.A. (1992) — Auswirkungen von Bodenverdichtungen durch landwirtschaftliche Bodennutzung auf die mikrobielle Biomasse. Landbauforschung Völkenrode, Sonderheft 134 (1992), S. 1-120

179. Kaiser, K.; Guggenberger, G.; Haumaier, L.; Zech, W. — Seasonal variations in the chemical composition of dissolved organic matter in organic forest floor layer leachates of old-growth Scots pine (Pinus sylvestris L.) and European beech (Fagus sylvatica L.) stands in northeastern Bavaria, Germany. Biogeochemistry 55, 2 (2001), S. 103-143

180. Kalbitz, K.; Solinger, S.; Park, J.H.; Michalzik, B.; Matzner, E. — Controls on the dynamics of dissolved organic matter in soils: a review. Soil Science 165, 4 (2000), S. 277-304

181. Kamp, T., Steindl, H., Hantschel, R.E., Beese, F., Munch, J.C. — Nitrous oxide emissions from a fallow and wheat field as affected by increased soil temperatures. Biology and Fertility of Soils 27 (1998), S. 307-314.

182. Kamp, T; Choudhury, K.; Ruser, R.; Hera, U.; Rötzer, T. — Auswirkungen von Klimaänderungen auf Böden – Beeinträchtigungen der natürlichen Bodenfunktionen. In: Umweltbundesamt (Hrsg.) (2008): UBA-Workshop „Böden im Klimawandel – Was tun?!“ am 22./23. Januar 2008, Dessau-Roßlau, S. 17-36

183. Kanerva, T.; Palojärvi, A.; Rämö, K.; Manninen, S. — Changes in soil microbial community structure under elevated tropospheric O3 and CO2. Soil Biology & Biochemistry 40, 10 (2008), S. 2502-2510

184. Kayser, M. — Aspekte zum Wasserhaushalt von Sandlössen im Mitteldeutschen Trockengebiet. Techn. Univ. Berlin, Fakultät VII, Diss. (2002)

185. Kemfert, C. — Der Mensch beeinflusst das Klima – was muss er dafür bezahlen?: Die ökonomischen Kosten des Klimawandels. In: Hiller,B & Lange, M.A. (Hrsg.): Globale Umweltveränderungen und Wetterextreme – was kostet der Wandel? Münster : Zentrum für Umweltforschung (2007), S. 125-133

186. Kesik, M., et al. — Inventories of N2O and NO emissions from European forest soils, Biogeosciences 2 (2005), S. 353–375

187. Kesik, M., N. Bruggemann, R. Forkel, R. Kiese, R. Knoche, C.S. Li, G. Seufert, D. Simpson, and K. Butterbach-Bahl — Future scenarios of N2O and NO emissions from European forest soils. Journal of Geophysical Research-Biogeosciences 111 (2006)

188. Khaziyey, F.K. — Dynamics of enzymic activity in the chernozems of the cis-ural region. Translated from: Pochvovedeniye. 10. S. 114-125. Soviet Soil Sci. S. 552-563 (1997)

189. Kibblewhite, M.G., Jones, R.J.A., Montanarella, L., Baritz, R., Huber, S., Arrouays, D., Micheli, E. and Stephens, M. (eds) — Environmental Assessment of Soil for Monitoring Volume VI: Soil Monitoring System for Europe. EUR 23490 EN/6, Office for the Official Publications of the European Communities Luxembourg (2008), 72 S. http://eusoils.jrc.ec.europa.eu/projects/envasso/documents/ENV_Vol-VI_Final2_web.pdf. Cited (19 Apr 2010)

190. Kirkby, M.J., Cox, N.J. — A climatic index for soil erosion potential (CSEP) including Seasonal and vegetation factors, Catena 25 (1995), S. 333-352

191. Kirschbaum, M.U.F. — The temperature dependence of organic matter decomposition – still a topic debate. Soil Biology & Biochemistry 38 (2006), S. 2510-2518

192. Klaghofer, E.; Murer, E. — Klimaänderung – Boden und Wasserhaushalt, Auswirkungen von Klimaänderungen auf den Zustand der Böden, speziell auf den Wasser- und Stickstoffhaushalt. Local land & soil news Nr. 9/1/04

193. Klotz, D. — Ausbreitungs- und Abbauverhalten von Pestiziden im unterirdischen Wasser unter Boden. Zeitschrift für Umweltchemie und Ökotoxikologie 11, 3 (1999), S. 151-156

194. Koerner, C. — Waldbäume in einer CO2-reichen Welt. Botanisches Institut, Universität Basel (2005) http://pages.unibas.ch/botschoen/scc/waldbaeume.pdf [30.07.2009]

195. Kolb, E.; Rehfuess, K.E. (1997) — Auswirkungen eine Temperaturerhöhung in einem Freilandexperiment auf den Stickstoffaustrag aus Bodensäulen mit verschiedenartiger Humusform. Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde 160, 5 (1997), S. 539-547

196. Kolbe, H. — Einflussfaktoren auf den Humusgehalt. Bodenschutz im Klimawandel – Nur 2 grad mehr? – WORKSHOP 30.06. – 01.07.2008

197. Kölling, C. — Klimahüllen für 27 Waldbaumarten. AFZ / Der Wald 23/2007: S. 1242-1245

198. Kölling, C.; Zimmermann, L.; Walentowski, H. — Klimawandel: Was geschieht mit Buche und Fichte? AFZ – Der Wald 11/2007, S. 584-588

199. Koordinierungsstelle der Geodateninfrastruktur Deutschland — Architektur der Geodateninfrastruktur Deutschland. Version 1.0 (2007).

200. Koordinierungsstelle der Geodateninfrastruktur Deutschland — Architektur der Geodateninfrastruktur Deutschland. Version 2.0. Technisches Konzept zur fach- und ebenenübergreifenden Bereitstellung von Geodaten im Rahmen des E-Government in Deutschland (2010).

201. Koordinierungsstelle Portal U — Fachliches Feinkonzept InGrid®2.3 Überarbeitung des InGrid®Editors, Version 1.2. (2010).

202. Koordinierungsstelle Portal U — Fachliches Feinkonzept InGrid®2.2 zum Austausch und Darstellung numerischer Daten, Version 1.0. (2005).

203. Koordinierungsstelle Portal U — DV-technisches Feinkonzept PortalU®/InGrid®1.0, Version 1.0. (2005).

204. Koordinierungsstelle Portal U — Anleitung für die Erfassung von Metadaten im InGrid®Editor. Version 1.4. (2010).

205. Koordinierungsstelle Portal U — Portal-U / InGrid 1.0 – Datenmodell. Version 1.0. (2005).

206. Körschens, M. — Dauerfeldversuche als unverzichtbare und unwiederbringliche experimentelle Grundlage der Agrar-, Umwelt- und Ernährungsforschung (Konzeption zum Erhalt und zur umfassenden Nutzung von Dauerfeldversuchen) (2006).
In: Protokoll der IOSDV-Wintertagung 2004.
<http://www.igzev.de/IOSDV/Aktuelles.htm#Konzeption>

207. Körschens, M.; Rogastik, J.; Schulz, E. — Bilanzierung und Richtwerte organischer Bodensubstanz. Landbauforschung Völkenrode 1/2005 (55), S. 01-10.

208. Kronvang, B. — The export of particulate matter, particulate phosphorus and dissolved phosphorus from two agricultural river basins: Implications on estimating the non-point phosphorus load. Water Res. 26 (1992), S. 1347–1358

209. Krysanova, V., D.I. Müller-Wohlfeil and A. Becker — Development and test of a spatially distributed hydrological / water quality model for meso-scale watersheds. Ecological Modelling 106 ,1-2 (1998), S. 261-289

210. Kühn , I.; Vohland, K.; Badeck, F.; Hanspach, J.; Pompe, S.; Klotz, S. — Aktuelle Ansätze zur Modellierung der Auswirkungen von Klimaveränderungen auf die biologische Vielfalt. Natur & Landschaft 84 (2009), S. 8-12

211. LABO (2004) — Flächenhafte Darstellung punktbezogener Daten über Stoffgehalte in Böden. Autoren: Backes, J.; Blasberg, G.; Böttcher, G.; Glante, F.; Martin, W.; Thiele, V.; Utermann, J.; Vorderbrügge, T.; Wolf, D., (Juni 2004).

212. Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG) — Auswirkungen des Klimawandels auf Böden in Niedersachsen, Hannover (2009), S. 27

213. Langer, U.; Rinklebe, J. — Lipid biomarkers for assessment of microbial communities in floodplain soils of the Elbe River (Germany). Wetlands. 29 (2009), S. 353-362

214. Lebert, M. — Herleitung und Darstellung der potenziellen, mechanischen Verdichtungsempfindlichkeit für Unterböden von Ackerflächen der Bundesrepublik Deutschland Zwischenergebnisse aus dem UBA-Vorhaben: „Entwicklung eines Prüfkonzeptes zur Erfassung der tatsächlichen Verdichtungsgefährdung landwirtschaftlich genutzter Böden“ (2010). FKZ 3707 71 202

215. Lebert, M. und W. Schäfer — Verdichtungsgefährdung niedersächsischer Ackerböden. Bodenschutz 2/05, S. 42-46

216. Lee, J.J., D.L. Phillips, and R.F. Dodson — Sensitivity of the US corn belt to climate change and elevated CO_2: II. Soil erosion and organic carbon. Agricultural Systems 52 (1996), S. 503-521

217. Lennartz, B., Michaelsen, J., Wichtmann, W., Widmoser, P. — Time variance analysis of prefer-ential solute movement at a tiledrained field site. Soil Sci. Soc. Am. J. 63 (1999), S. 39–47

218. Lewandowski, J.; Leitschuh, S; Koß, V. — Schadstoffe im Boden – Eine Einführung in Analytik und Bewertung. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York (1997)

219. LfULG – Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie — Auswirkungen des Klimawandels auf die Ertragsentwicklung in Sachsen. Abschätzung der Klimafolgen auf den Wasserhaushalt der Böden Sachsens. (2009)

220. Li, C.S., Frolking, S., Butterbach-Bahl, K. — Carbon sequestration in arable soils is likely to increase nitrous oxide emissions, offsetting reductions in climate radiative forcing. Climatic Change 72 (2005), S. 321-338

221. Lindahl, A. M. L.; Dubus, I.G.; Jarvis, N.J. — Site classification to predict the abundance of the deep-burrowing earthworm Lumbricus terrestris L. Vadose Zone Journal 8 (2009), S. 911-915

222. Lindenschmidt, K.-E., G. Ollesch and M. Rode — Physically-based hydrological modelling for non-point dissolved phosphorus transport in small and medium-sized river basins. Hydrol. Sci. J. 49, 3 (2004)

223. Lorenz, M. — Auswirkungen von Klimaänderungen auf den Bodenwasserhaushalt, Biomasseproduktion und Degradierung von Niedermooren im Spreewald. Techn. Univ. Berlin, Fakultät VI – Planen, Bauen, Umwelt, Diss. (2008)

224. Luce, A.; Haag, I.; Bremicker, M. — Einsatz von Wasserhaushaltsmodellen zur kontinuierlichen Abflussvorhersage in Baden-Württemberg. Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, April 2006, S. 56-66

225. Lundquist, E.J.; Jackson, L.E.; Scow, K.M. — Wet-dry cycles affect dissolved organic carbon in two California agricultural soils. Soil Biology and Biochemistry 31, 7 (1999), S. 1031-1038

226. M. Schilcher, A. Fichtinger, T. Kutzner, U. Schäffler, J. Stahl, P. Weiser — INSPIRE – GMES. Informationsbroschüre: Grundlagen, Status, Projektberichte (2010).

227. Ma, J.; Hang, H.; Blanchard, P. — How Do Climate Fluctuation Affect Persistent Organic Distribu-tion in North America? Evidence from a Decade of Air Monitoring. Envir. Sci. Technol. 38 (2004), S. 2538-2543

228. Macdonald, J.A., Fowler, D., Hargreaves, K.J., Skiba, U.I., Leith, D., Murray. M.B. 1998 — Methane emission rates from a northern wetland; Response to temperature, water table and transport. Atmospheric Environment 32 (1998), S. 3219-3227

229. Markart G., Kohl B., Sotier B., Schauer T., Bunza G. und Stern R. (2004) — Provisorische Geländeanleitung zur Abschätzung des Oberflächenabflussbeiwertes auf alpinen Boden-/Vegetationseinheiten bei konvektiven Starkregen (Version 1.0). BFW-Dokumentation. 3, 83 (2004)

230. Marschner, B.; Bredow, A. — Temperature effects on release and ecologically relevant properties of dissolved organic carbon in sterilised and biologically active soil samples. Soil Biology and Biochemistry 34 (2002), S. 459-466

231. Meehl, G.A., F. Zwiers, J. Evans, T. Knutson, L. Mearns, and P. Whetton — Trends in extreme weather and climate events: Issues related to Haussmann extremes in projections of future climate change. Bulletin of the American Meteorological Society 81 (2000), S.427-436

232. Megraw, S., Knowles, R. — Methane production and consumption in a cultivated humisol. Biol. Fertil. Soil 5 (1987), S. 56–60

233. Merritt, W.S., R.A. Letcher, and A.J. Jakeman — A review of erosion and sediment transport models. Environmental Modelling & Software 18 (2003), S. 761-799

234. Michael, A., J. Schmidt, W. Enke, T., Deutschlander, & G. Malitz — Impact of expected increase in precipitation intensities on soil loss – results of comparative model simulations. Catena 61 (2005), S. 55-164

235. Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (MUNLV) — Anpassungen an den Klimawandel – Eine Strategie für Nordrhein-Westfalen, Düsseldorf (2009), 166 S.

236. Ministerium für Umwelt, Energie und Verkehr — Boden und Altlasten – Bodenerosion. http://www.saarland.de/28626.htm. 29.06.2009

237. Misson, L.; Gershenson, A.; Tang, J.W.; McKay, M.; Cheng, W.X.; Goldstein, A., — Influences of canopy photosynthesis and summer rain pulses on root dynamics and soil respiration in a young ponderosa pine forest. Tree Physiol. 26 (2006), S. 833–844

238. Mitchell, J.K. and G.D. Bubenzer 1980 — Soil loss estimations, in M.J. Kitkby and R.P.C. Morgan (eds.) Soil Erosion, Chichester: Wiley (1980), S. 17-62

239. MLU – Ministerium für Landwirtschaft und Umwelt des Landes Sachsen-Anhalt — Entwurf der Strategie des Landes Sachsen-Anhalt zur Anpassung an den Klimawandel. Magdeburg (2009)

240. MLUV – Ministerium für Ländliche Entwicklung, Umwelt und Verbraucherschutz des Landes Brandenburg — Maßnahmenkatalog zum Klimaschutz und zur Anpassung an die Folgen des Klimawandels. Ref. Presse- und Öffentlichkeitsarbeit; Potsdam (2008)

241. Mondini, C.; Contin, M.; Leita, L.; De Nobili, M. — Response of microbial biomass to air-drying and rewetting in soils and compost. Geoderma 105 (2002), S. 111-124

242. MONTEITH, J.L (1965) — Evaporation and environment. In: Fogy, G.T. (ed): Sympos. The state and movement of water in living organism. Cambridge (Univ. Press) (1965), S. 205-234

243. Morgan, J.A., Mosier, A.R., Lecain, D.R., Parton, W.J., Milchunas, D.G. 2001 — Elevated CO2 enhances productivity and the C/N ratio of grasses in the aussman shortgras steppe. Proceedings of the XIX International Grassland congress 2001, S. 981–982

244. Morgan, R.P.C. — Soil erosion measurement and soil conservation research in cultivated areas of the UK. The Geographical Journal 151, 1 (1985), S. 11-20

245. Mosimann, T., Bug, J. Sanders, S. und F. Beisiegel — Bodenerosionsdauerbeobachtung in Niedersachsen 2000 – 2008. Geosynthesis H 14, Veröffentlichungen des Inst. F. Physische Geographie und Landschaftsökölogie der Leibnitz Universität Hannover (2009)

246. Muhr, J., Goldberg, S.D., Borken, W., Gebauer, G. — Repeated drying-rewetting cycles and their effects on the emission of CO2, N2O, NO, and CH4 in a forest soil. Journal of Plant Nutrition and Soil Science-Zeitschrift Fur Pflanzenernahrung und Bodenkunde 171 (2009), S. 719-728

247. Müller, G. — Bodenfeuchteverlauf in Kulturpflanzenbeständen. Kurzberichte, Wissenschaftl. Jahrestagung 1985 der Sektion Pflanzenproduktion der Humboldt-Univ. Berlin, 5./6.09.1985, Berlin 1985, S. 21-23

248. Müller, G. jun.; Hickisch, B. — Einfluss von Witterung und Kulturpflanzenbestand auf bodenbiologische Leistungen. 1. Mitt.: Versuchsprogramm und erste Ergebnisse der Prüffaktoren CO2-Dynamik und Mikrobenbesiedlung. Zbl. Mikrobiol. 137 (1982), S. 541-549

249. Müller, J.; Böttcher, F.; Schmidt, M. (o.D.) — Bodenwasserhaushaltstrends im Trockengebiet und Konsequenzen für die Landnutzung, Deutscher Wetterdienst, Abt. Agrarmeteorologie, Außenstelle Leipzig, 17 S.

250. Müller, J.; Jörn, P. — Die Auswirkungen des Klimawandels im Mitteldeutschen Trockengebiet auf den Bodenwasserhaushalt und ihre Konsequenzen für die Landnutzung. In: Landesamt für Umweltschutz Sachsen-Anhalt (Hrsg.) (2007): Künftige Klimaänderungen in Sachsen-Anhalt – Sachstand und Handlungsfelder – Workshop am 16.Juni 2006 im Landesamt für Umweltschutz, Halle. Berichte des Landesamtes für Umweltschutz Sachsen-Anhalt, Sonderheft 1/2007, S. 88

251. Müller, J.; Jörn,. P.; Schumann, A.; Schellin, H. — Evapotranspirations- und Versickerungsverhalten sowie Häufigkeit von Bodendürren im Mitteldeutschen Trockengebiet unter Berücksichtigung von Substrat und Bewuchs. In: Deutscher Wetterdienst: Klimastatusbericht 2001, Offenbach a.M., S. 258-267

252. Mustin, K., Benton, T.G., Dytham, C., Travis, J.M.J. — The dynamics of climate-induced range shifting; perspectives from simulation modelling. Oikos 118 (2009), S. 131-137

253. Nannipieri, P.; Ascher, J.; Ceccherini, M.T.; Landi, L.; Pietramellara, G.; Renella G. — Microbial diversity and soil functions. European Journal of Soil Science 54 (2003), S. 655-670

254. Natural Resource Ecology Laboratory (NREL) — CENTURY Soil Organic Matter Model Version 5 (2009) http://www.nrel.colostate.edu/projects/century5/ [03.06.2009]

255. Nearing, M.A., F.F. Pruski, and M.R. O'Neal — Expected climate change impacts on soil erosion rates: A review. Journal of Soil and Water Conservation 59 (2004), S. 43-50

256. Nearing, M.A., V. Jetten, C. Baffaut, O. Cerdan, A. Couturier, M. Hernandez, Y. Le Bissonnais, M.H. Nichols, J.P. Nunes, C.S. Renschler, V. Souchere, and K. van Oost — Modeling response of soil erosion and runoff to changes in precipitation and cover. Catena 61 (2005), S. 31-154

257. Neftel, A., C. Flechard, C. Ammann, F. Conen, L. Emmenegger, and K. Zeyer. — Experimental assessment of N2O background fluxes in grassland systems. Tellus Series B-Chemical and Physical Meteorology 59 (2007), S. 470-482

258. Nicks, A.D. — Modeling hydrologic impacts of global change using stochastically generated climate change scenarios. In Eckstein, Y., Zaporozec, A. (Eds.), industrial and Agricultural impacts on the hydrologic environments. Proceedings of the second USA/CIS joint Conference on Environmental Hydrology. Water Environment Federation, Alexandria (1993)

259. Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung (NLfB) (Hrsg.) — Arbeitshefte Boden – Untersuchung bodenbiologischer Parameter im Rahmen der Boden-Dauerbeobachtung in Niedersachsen Bodenbiologische Referenzwerte und Zeitreihen, Heft 2001/4

260. Niedersächsisches Ministerium für Umwelt und Klimaschutz (NMUK) — Klimawandel-Herausforderung für Staat und Gesellschaft. Hannover (2008)

261. Nissen, B. — Vorhersage der mechanischen Belastbarkeit repräsentativer Ackerböden der BRD. Dissertation, Univ. Kiel (1998)

262. Nitsche, O. — Bodenbearbeitung und Humushaushalt von Ackerflächen im Hinblick auf den Klimawandel in Sachsen. (2009)

263. Nouira A., Sayouty E.H. and M. Benmansour 2003 — Use of 137Cs technique for soil erosion study in the agricultural region of Casablanca in Morocco Journal of Environmental Radioactivity, Volume 68, Number 1 (2003), S. 11-26 (16)

264. Olesen, J.E., and M. Bindi — Consequences of climate change for European agricultural productivity, land use and policy. European Journal of Agronomy 16 (2002), S. 239-262

265. Orchard, V.A.; Cook, F.J. — Relationship between soil respiration and soil moisture. Soil Biology and Biochemistry 15, 4 (1983), S. 447-453

266. Orchard, V.A.; Cook, F.J.; Corderoy, D.M. — Field and laboratory studies on the relationships between respiration and moisture for two soils of contrasting fertility status. Pedobiologia 36 (1992), S. 21-33

267. Otte, S., Schalk, J., Kuenen, J.G., Jetten, M.S.M. — Hydroxylamine oxidation and subsequent nitrous oxide production by the heterotrophic ammonia oxidizer Alcaligenes faecalis. Applied Microbiology and Biotechnology 51 (1999), S. 255-261

268. Overesch, M.; Düster, L.; Greef, K.; Rinklebe, J.; Mansfeldt, T. — Ermittlung und Beurteilung des Mobilisierungspotenzials von Arsen in Böden. Abschlussbericht, Länderfinanzierungsprogramm „Wasser, Boden und Abfall“, Projekt B 4.07., Köln, Koblenz-Landau, Wuppertal (2008)

269. Overesch, M.; Rinklebe, J.; Broll, G.; Neue, H.-U. (2007) — Metals and arsenic in soils and corresponding vegetation at Central Elbe river floodplains (Germany). Environmental Pollution. 145. 800-812.

270. Parton, W.J. Schimel, D. S., Cole, C. V. & Ojima, D. S. — Analysis of factors controlling soil organic matter levels in Great Plains Grasslands. Soil Sci. Soc. Am. J. 51 (1987), S. 1173–-1179

271. Paul, E.A.; Clark, F.E. — Soil microbiology and biochemistry. Academic Press, Second Edition San Diego (1996), 340 S.

272. Pavlíček, T.; Csudi, C.; Nevo, E. — Species richness and zoogeographic affinities of earthworms in the Levant. Pedobiologia 47 (2003), S. 452-457

273. Powlson, D. — “Climatology – Will soil amplify climate change?” Nature 433 (7023) (2005), S. 204-205.

274. Powlson, D.S.; Jenkinson, D.S. (1981) — A comparison of the organic matter, biomass, adenosinetriphosphate and mineralizable contents of ploughed and direct drilled soils. J. agric. Sci. Cambr. 97 (1981), S. 713-721

275. Preger, A.C. et al. — Humusgehalte in nordrhein-westfälischen Ackerböden: Aktueller Status und zeitliche Entwicklung. Unveröffentlichter Abschlussbericht einer Studie des Bereichs Bodenwissenschaften der Universität Bonn für das Landesumweltamt NRW; Essen (2006), 100 S.

276. Pruski, F.F., and M.A. Nearing — Climate-induced changes in erosion during the 21st century for eight US locations. Water Resources Research 38 (2002)

277. Quine, T.A. — Estimation of erosion rates from caesium -137 data: the calibration question. In Sediment and Water Quality in River Catchments, I.D.L. Foster, A.M. Gurnell and B.W. Webb (eds.), John Wiley, Chichester (1995), S. 307-329

278. Quine, T.A. — Use of caesium-137 data for validation of spatially distributed erosion models: the implications of tillage erosion. Catena 37 (1999), S. 415-430

279. Rammert, U. — Monitoring von Klimaänderungen mit Hilfe von Bioindikatoren. Schriftenreihe Landesamt für Natur- und Landschaft des Landes Schleswig-Holstein 9 (2005), S. 7-22

280. Raubuch, M.; Joergensen, R.G. — C and net N mineralisation in a coniferous forest soil: the contribution of the temporal variability of microbial biomass C and N. Soil Biology and Biochemistry 34, 6 (2002), S. 841-849

281. Reichstein, M.; Beer, C. — Soil respiration across scales: The importance of a model-data integration framework for data interpretation. Journal of Plant Nutrition and Soil Science 171, 3 (2008), S. 344-354

282. Richter, A., Adler. Gert H., Fahrak, M & W. Eckelmann — Erläuterungen zur nutzungsdifferenzierten Bodenübersichtskarte der Bundesrepublik Deutschland im Maßstab 1:1000000 (BÜK 1000 N, Version 2.3), Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (Hrsg.), Hannover (2007)

283. Richter, D.; Hofmockel, M.; Callaham, M.A.; Powlson, D.S. & Smith, P. — Long-Term Soil Experiments: Keys to Managing Earth's Rapidly Changing Ecosystems. Soil Sci. Soc. Am. J. 71 (2007), S. 266-279

284. Richter, J.; Nordmeyer, H.; Kersebaum, K.C. — Simulation of nitrogen regime on loess soils in the winter half year – comparison between field measurements and simulations. Plant & Soil 83 (1985), S. 419-431

285. Riksen, M.J.P.M. — The role of wind erosion in agricultural land management and nature development. PhD Thesis, Wageningen University and Research Centre (2006)

286. Rinker, A.; Deunert, F.; Schmidt, G.; Schröder, W. — Phosphor und Stickstoff in Böden Schleswig-Holsteins bei steigenden Lufttemperaturen. In: Umweltbundesamt (Hrsg.) (2008): UBA-Workshop „Böden im Klimawandel – Was tun?!“ am 22./23. Januar 2008, Dessau-Roßlau

287. Rinklebe, J. — Differenzierung von Auenböden der Mittleren Elbe und Quantifizierung des Einflusses von deren Bodenkennwerten auf die mikrobielle Biomasse und Bodenenzymaktivitäten von Glucosidase, Protease und alkalischer Phosphatase. Dissertation. Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Landwirtschaftliche Fakultät, Institut für Bodenkunde und Pflanzenernährung, Halle/Saale (2004), 113 S.

288. Rinklebe, J. (unveröffentl. Daten) — Hg-Konzentrationen in Bodenlösung und Grundwasser an Auenstandorten der Elbe im Zeitraum 2001-2006

289. Rinklebe, J.; During, A.; Overesch, M.; Du Laing, G.; Wennrich, R.; Stärk, H.-J.; Mothes, S. — Dynamics of mercury fluxes and their controlling factors in large Hg-polluted floodplain areas. Environmental Pollution 158 (2010), S. 308-318.

290. Rinklebe, J.; During, A.; Overesch, M.; Wennrich, R.; Stärk, H.-J.; Mothes, S.; Neue, H.-U. Optimization of the simple field method to determine mercury volatilization from soils – Examples of 13 sites in floodplain ecosystems at the Elbe River (Germany). Ecological Engineering 35 (2009), S. 319-328

291. Rinklebe, J.; Franke; C.; Neue, H.-U. Aggregation of Floodplain Soils as an Instrument for Predicting Concentrations of Nutrients and Pollutants. Geoderma 141 (2007a), S. 210-223

292. Rinklebe, J.; Langer, U. Microbial diversity in three floodplain soils at the Elbe River (Germany). Soil Biology and Biochemistry 38, 8 (2006), S. 2144-2151

293. Rinklebe, J.; Langer, U. Floodplain soils at the Elbe River, Germany, and their diverse microbial biomass. Archive of Agronomy and Soil Science 54 (2008), S. 259-273

294. Rinklebe, J.; Langer, U. Relationship between soil microbial biomass determined by SIR and PLFA analysis in floodplain soils. Journal of Soils and Sediments 10 (2010), S. 4-8

295. Rinklebe, J.; Stubbe, A.; Overesch, M.; Neue, H.-U. Abschlußbericht des vom Ministerium für Landwirtschaft und Umwelt des Bundeslandes Sachsen-Anhalt und des Europäischen Strukturfonds (EFRE) geförderten und vom Landesamt für Umweltschutz (LAU) verwalteten Forschungsprojektes „Quantifizierung der Quecksilberausgasung aus Auenböden der Elbe“ (FKZ 76213/01/05) (2007b)

296. Rinklebe, J; Overesch, M.; Stubbe, A.; Neue, H.-U. Abschlussbericht des vom Ministerium für Landwirtschaft und Umwelt des Bundeslandes Sachsen-Anhalt und des Europäischen Strukturfonds (EFRE) geförderten und vom Landesamt für Umweltschutz (LAU) verwalteten Forschungsprojektes „Gefahrenabschätzung für Grundwasser und Nutzpflanzen bei erhöhten Gehalten von Cadmium, Zink, Kupfer, Chrom, Nickel, Blei, Quecksilber und Arsen in Auenböden der Elbe“ (FKZ 76213/08/01). Berichtszeitraum: 01.10.2001 bis 30.09.2005, 281 S.

297. Rippel, R. and F. Stumpf. Auswirkungen der Klimaänderung auf die Bodenerosion durch Wasser in Bayern bis 2050. Marktredwitzer Bodenschutztage, Tagungsband: Boden und Klima im Wandel, Marktredwitz 2008, S. 20-27

298. Ritchie, G.A.F., Nicholas, D.J., 1972 Identification of Sources of Nitrous-Oxide Produced by Oxidative and Reductive Processes in Nitrosomonas-Europaea. Biochemical Journal 126 (1972) S. 118

299. Rogasik, J; Schroetter, S.; Funder, U; Schnug, E.; Kurtinecz, P. Longterm fertilizer experiments as a data base for calculating the carbon sink potential of arable soils. Arch Agron Soil Sci 50/1, Spez. Heft (2004), S. 11-19

300. Römbke, J.;Jänsch, S.; Didden, W. The use of earthworms in ecological soil classification and assessment concepts. Ecotoxicology and Environmental Safety 62 (2005), S. 249-265

301. Rowan, J.S., P. Goodwill and M. Greco Temporal variability in catchment sediment yield determined from repeated bathymetric surveys: Abbeystead reservoir, UK. Physics and Chemistry of the Earth 20 Nr. 2 20 (1995), S. 199-206

302. Ruser, R., T. Kamp, K. Choudhury, U. Hera, and T. Rötzer — Minderung der N2O-Freisetzung aus landwirtschaftlich genutzten Böden Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) / Umweltbundesamt (UBA) FG II 2.7. (2008)

303. Rutgers, M.; Mulder, C.; Schouten, A.J. (Eds.) — Soil ecosystem profiling in the Netherlands with ten references for biological soil quality. RIVM Report 607604009 (2008), 88 S.

304. Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (SMUL) — Forschungsprojekt KliWEP (Laufzeit: 2004-2010) http://www.smul.sachsen.de/umwelt/klima/2469.htm [19.03.2009]

305. Sächsisches Staatsministerium für Umwelt und Landwirtschaft — http://www.landwirtschaft.sachsen.de/de/wu/Landwirtschaft/lfl/inhalt/7119_7121.htm (29.06.2009)

306. Sächsisches Staatsministerium für Umwelt und Landwirtschaft – SMUL — Klimawandel und Landwirtschaft – Strategie zur Anpassung der sächsischen Landwirtschaft an den Klimawandel. Zentraler Broschürenversand der Sächsischen Staatsregierung; Dresden (2009)

307. Sauer, S.; Haußmann, W.; Harrach, T. — Effektive Durchwurzelungstiefe, Sickerwasserbildung und Nitratverlagerung in tiefgründigen Lößböden eines Trockengebietes. In: Journal of Plant Nutrition and Soil Science 165 (3) (2002), S. 249-374

308. Schils, R.; Kuikman, P.; Liski, J.; van Oijen, M.;Smith, P.; Webb, J.; Alm, J.; Somogyi, Z.; van den Akker, J.; Billett, M.; Emmett, B.; Evans, C.; Lindner, M.; Palosuo, T.; Bellamy, P.; Alm, J; Jandl, R. and Hiederer, R. — ClimSoil-Final Report „Review of Existing Information on the Interregulation between Soil and Climate Change. Contract number 070307/2007/486157/SER/B1. (2008)

309. Schimel, J.P.; Gulledge, J.M.; Clein-Curley, J.S.; Lindstrom, J.E.; Braddock, J.S. — Moisture effects on microbial activity and community structure in decomposing birch litter in Alaskan taiga. Soil Biology & Biochemistry 31(1999), S. 831-838

310. Schindler, U.; Steidl, J.; Müller, L.; Eulenstein, F.; Thiere, J. — Drought risk to agricultural land in Northeast and Central Germany. Journal of Plant Nutrition and Soil Science 170, 3 (2007), S. 357-362

311. Schink, B. — Die Rolle von Mikroorganismen im Stoffkreislauf und in der Natur. In: Fuchs, G. (Hrsg.): Allgemeine Mikrobiologie. 8. Auflage, Georg Thieme Verlag, Stuttgart New York (2007), S. 525-570.

312. Schinner, F.; Öhlinger, R.; Kandeler, E.; Margesin, R. (Hrsg.) — Bodenbiologische Arbeitsmethoden. 2. überarbeitete und erweiterte Auflage. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York (1993), 389 S.

313. Schinner, F.; Sonnleitner, R. — Bodenökologie: Mikrobiologie und Bodenenzymatik. Bd. I. Grundlagen, Klima, Vegetation und Bodentyp. Springer Verlag. Berlin Heidelberg New York (1996). 450 S

314. Schlesinger, W.H. — Biogeochemistry – an analysis of global change. Academic Press, Orlando (1997)

315. Schlichting, E.; Blume, H.-P.; Stahr, K. — Bodenkundliches Praktikum, Blackwell Wissenschafts-Verlag Berlin (1995), 295S.

316. Schmidt, J., von Werner, M.; Michael, A. und W. Schmidt — Erosion-2D/3D: Ein Computermodell zur Simulation der Bodenerosion durch Wasser. Dresden/Freiberg, Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft (1996), 240 S.

317. Schmitt, A.; Glaser, B.; Borken, W.; Matzner, E. — Repeated freeze-thaw cycles changed organic matter quality in a temperate forest soil. Journal of Plant Nutrition and Soil Science 171, 5 (2008), S. 707-718

318. Schnug, E.; Haneklaus, S. — Landwirtschaftliche Produktionstechnik und Infiltration von Böden: Beitrag des ökologischen Landbaus zum Hochwasserschutz. Landbauforsch. Völkenrode 52, 4 (2002), S. 197-203

319. Schnug, E.; Rogasik, J.; Panten, K.; Paulsen, H-M.; Hanklaus, S. — Ökologischer Landbau erhöht die Versickerungsleistung von Böden. Ökologie und Landbau 132, 32 (2004), S. 53-55

320. Scholz, G., J.N. Quinton, and P. Strauss — Soil erosion from sugar beet in Central Europe in response to climate change induced seasonal precipitation variations. Catena 72 (2008), S. 91-105

321. Schrader, S. — Bodentiere als „ecosystem engineers“ in Agrarökosystemen. Wasser & Boden 51, 12 (1999), S. 48-51

322. Schröder, T.J.; Hiemstra, T.; Vink, J.P.M.; van der Zee — Modeling of the Solid−Solution Partitioning of Heavy Metals and Arsenic in Embanked Flood Plain Soils of the Rivers Rhine and Meuse Environ. Sci. Technol. 39 (2005), S. 7176–7184

323. Schröder, W.; Schmidt, G.; Pesch, R. — Repräsentanz und Vergleichbarkeit von Daten und Flächen der Bodendauerbeobachtung. Journal of Plant Nutrition and Soil Science. Bd. 166, Heft 5, S. 649–659 (2003)

324. Schrumpf, M.; Freibauer, A. — CarboEurope und Erfahrungen im Bodenmonitoring. In: Umweltbundesamt (Hrsg.) (2008): UBA-Workshop „Böden im Klimawandel – Was tun?!“ am 22./23. Januar 2008, Dessau-Roßlau, S. 275-285

325. Schulze, E. D.; Luyssaert, S.; Ciais, P.; Freibauer, Annette; Janssens, I. A. — Importance of methane and nitrous oxide for Europe’s terrestrial greenhouse-gas balance. Nature Geoscience, Band Published online: 22 November 2009, incl. Supplementary information.

326. Seiler, K.-P. — Barriere Boden. In: Flinsbach, D. (Hrsg.): Pflanzenschutzmittel im Wasser. Schriftenreihe Wasser 65 (1994), S. 17-31

327. Shannon, R.D., White, J.R., 1994 — 3-Year Study of Controls on Methane Emissions from 2 Michigan Peatlands. Biogeochemistry 27 (1994), S. 35-60

328. Smets, T., Poesen, J. and E. Bochet — Impact of plot length on the effectiveness of different soil-surface covers in reducing runoff and soil loss by water. Source: Progress in Physical Geography 32, 6 (2008), S. 4-677

329. Smith et al. — Projected changes in mineral soil carbon of European croplands and grasslands. Global Change Biol. 11(2005), S. 2141-2152

330. Smith, K. A. — A model of the extent of anaerobic zones in aggregated soils, and its potential application to estimates of denitrification, J. Soil Sci. 31(1980), S. 263–277

331. Smith, K. A. — The potential feedback effects induced by global warming on emissions of nitrous oxide by soils. Global Change Biol. 3 (1997), S. 327– 338

332. Sommer, Th. — Die Wirkung des Globalen Wandels im Unstruteinzugsgebiet. Teilprojekt 3, Unstrut (BMBF Förderprojekt 07 GWK 03) (2003)

333. SONG, X.; VAN HEYST, B. — Volatilization of mercury from soils in response to simulated precipitation. Atmospheric Environ 39 (2005), S. 7494-7505

334. Spatz, P. — Möglichkeiten der länderübergreifenden Auswertung an Standorten der Bodendauerbeobachtung. Hrsg. Umweltbundesamt, Texte 22/01, 93 S.

335. Stahr, K.; Kandeler, E.; Herrmann, L.; Streck, T. — Bodenkunde und Standortlehre Grundwissen Bachelor. Verlag Eugen Ulmer Stuttgart. (2008)

336. Steinweg, J.M.; Plante, A.F.; Conant, R.T.; Paul, E.A.; Tanaka, D.L. — Patterns of substrate utilization during long-term incubations at different temperatures. Soil Biology & Biochemistry 40, 11 (2008), S. 2722-2728

337.	Stenitzer, E.	SIMWASER – Ein physikalisches Kompartimentmodell zum Bodenwasserhauhalt. In: GSF-Bericht 18/00, Institut für Hydrologie. „Methoden der Sickerwassermodellierung – Theorie und Praxis“ (2000) S. 29-34
338.	Swift, M.J.; Heal, O.W.; Anderson, J.M.	Decomposition in terrestrial ecosystems. Studies in Ecology, Volume 5. Oxford, UK: Blackwell Scientific Publications. (1979), 372 S.
339.	Tabatabai, M.A.; Dick, W.A.	Enzymes in Soil. Research and Developments in Measuring Activities. In: Enzymes in the Environment. Activity, Ecology and Applications. Ed. by Burns, R.G.; Dick, R.P.; Marcel Dekker, Inc. New York. Basel (2002), S. 567-596
340.	Tassos Bassoukos et al. (GS SOIL)	D5.1 Design Specifications of GS Soil Portal and Integrated Network. (2009).
341.	Tchistiakov, A.; Jellema, J.; Preuss, H.; Hernandez Diaz, T.; Cannell, B.; Passmore, J.; Mardal, T.; Capova, D.; Belickas, J.; Rapsevicius, V.:	eEarth: Bridging the divided national geo-databases via multilingual web application. 10th International Symposium on Information and Communication Technologies in Urban and Spatial Planning and Impacts of ICT on Physical Space. Vienna University of technology. 22. - 25. Febr. 2005 (unpublished)
342.	Tchistiakov, A.; Jellema, J.; Preuss, H.; Hernandez Diaz, T.; Cannell, B.; Passmore, J.; Mardal, T.; Capova, D.; Belickas, J.; Rapsevicius, V.	eEarth: Bridging the divided national geo-databases via multilingual web application. 10th International Symposium on Informtation and Communication Technologies in Urban and Spatial Planning and Impacts of ICT on Physical Space. Vienna University of technology. 22. - 25. Febr. 2005 (unpublished). (2005).

343. Tietema, A.W., Bouten, W., Wartenbergh, P.E. — Nitrous oxide dynamics in an oak-beech forest ecosystem in the Netherlands, For. Ecol. Manag. 44 (1991), S. 53-61

344. TMLNU - Thüringer Ministerium für Landwirtschaft, Naturschutz und Umwelt — gemeinsam Klimabewusst handeln – Thüringer Klima- und Anpassungsprogramm.Referat Presse, Öffentlichkeitsarbeit; Erfurt (2009)

345. Tomáš Řezník (GS SOIL) — D 3.1 INSPIRE compatible metadata profile for soil geographic datasets and dataset series. (2010a).

346. Tomáš Řezník (GS SOIL) — D 3.2 INSPIRE compatible metadata profile for soil geographic data services. (2010b).

347. Topp, E., Pattey, E. — Soils as sources and sinks for atmospheric methane. Canadian Journal of Soil Science 77, 2 (1997), S. 167-178

348. Trasar-Cepeda, C.; Gil-Sotres, F.; Leirós, M.C. — Thermodynamic parameters of enzymes in grassland soils from Galicia, NW Spain. Soil Biology & Biochemistry 39 (2007), S. 311-319

349. Umweltbundesamt (Hrsg.) — Themenblatt Anpassung an Klimaänderung in Deutschland – Landwirtschaft 12/2008

350. Umweltbundesamt (Hrsg.) — Anwendung von Bodendaten bei der Klimaanpassung. Ergebnisse des BOKLIM Workshops 29./30.September 2009. Dessau (in Vorbereitung) (2010)

351. Umweltbundesamt (Hrsg.) — Bodenbiologische Bewertung von Boden-Dauerbeobachtungsflächen (BDF) anhand von Lumbriciden. Workshop in Weimar. Texte 34/07. Dessau: 158 S.

352. Umweltbundesamt: — Themenblatt Anpassung an Klimaänderung in Deutschland – Landwirtschaft 12/2008

353. USDA Agricultural Research Service at the Grassland, Soil and Water Research Laboratory (USDA-ARS) — SWAT Soil & Water Assessment Tool. (2009) http://www.brc.tamus.edu/swat/ [03.06.2009]

354. Utermann, J., Meyenburg, G., Altfelder, S., Gäbler, H.-E., Duijnisveld, W., Bahr, A. & Streck, T. — Entwicklung eines Verfahrens zur Quantifizierung von Stoffkonzentrationen im Sickerwasser auf der Grundlage chemischer und physikalischer Pedotransferfunktionen. Endbericht, BMBF-Forschungsvorhaben 02WP0206 (2005), 169 S.

355. Van Oost K, Govers G, and P.J.J. Desmet — Evaluating the effects of changes in landscape structure on soil erosion by water and tillage. Landscape Ecology 15, 6 (2000), S. 579-591

356. Van Rompaey A, Verstraeten G, Van Oost K, Govers G and J. Poesen — Modelling mean annual sediment yield using a distributed approach. Earth Surface Processes and Landforms 26, 11 (2001), S. 1221-1236

357. Vanhala, P.; Karhu, K.; Tuomi, M.; Björklöf, K.; Fritze, H.; Liski, J. — Temperature sensitivity of soil organic matter decomposition in southern and northern areas of the boreal forest zone. Soil Biology & Biochemistry 140, 7 (2008), S. 1758-1764

358. Varsányi, I; Kovács, L.O. — Arsenic, iron and organic matter in sediments and groundwater in the Pannonian Basin, Hungary. Appl. Geochem. 21 (2006), S. 949–963

359. VDLUFA (Hrsg.) — Methodenhandbuch I. Die Untersuchung von Böden. – Lose-Blatt-Sammlung, 4.Auflage, 5.Teillieferung (1991)

360. VDLUFA (Hrsg.) — Methodenhandbuch VII. Umweltanalytik. 1. Auflage (1996)

361. Verstraeten G, Van Oost K, Van Rompaey A, Poesen J and G. Govers — Evaluating an integrated approach to catchment management to reduce soil loss and sediment pollution through modelling. Soil Use and Management 18 (2002), S. 386-394

362. VwV Datenaustausch — Verwaltungsvereinbarung zwischen Bund und Ländern über den Datenaustausch im Umweltbereich (Verwaltungsvereinbarung Datenaustausch). (1994)

363. Walling, D.E. and T.A. Quine — Use of Cesium-137 to Investigate Patterns and Rates of Soil-Erosion on Arable Fields. Soil Erosion on Agricultural Land (1990), S. 33-67

364. Wallschläger, D., Kock, H. H.; Schroeder, W. H.; Lindberg, S. E.; Ebinghaus, R.; Wilken, R.-D. — Mechanism and significance of mercury volatilization from contaminated floodplains of the Ger-man River Elbe. Atmospheric Environ. 34 (2000), S. 3745-3755

365. Wardle, D.A. — Controls of temporal variability of the soil microbial biomass: A global-scale synthesis. Review. Soil Biology & Biochemistry 30, 13 (1998), S. 1627-1637

366. Warren, A. — Wind erosion on European light soils. Final Report to the European Union Commission (2006)

367. Wasserrahmenrichtlinie WRRL — Richtlinie 2000/60/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2000 zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik. L 327, Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften, 22. Dezember 2000

368. Wechsung, F.; Gerstengarbe, F.-W.; Gräfe, P.; Hattermann, F.; Habeck, A.; Hauf, Y.; Lahmer, W.; Lasch, P.; Krysanova, V.; Post, J.; Suckow, F.; Wattenbach, M.; Werner, P.C.; Voß, F.; Wenig, R. — Brandburg-Simulator zu den Folgen globaler Umweltveränderungen (BEST). In: Potsdam-Insitut für Klimafolgenforschung e.V. (PIK) (2004): Zweijahresbericht 2000/2003, S. 30 (2004)

369. Wendling, U., Schellin, H.-G. u. Thomä, M. — Bereitstellung von täglichen Informationen zum Wasserhaushalt des Bodens für die Zwecke der Agrarmeteorologischen Beratung. Z. Meteorol. 41 (1991) 6, S.468-475.

370. Wilke, B.-M.; Beylich, A. Oberholzer, H.-R. — Beurteilung von Bodenverdichtungen aus Sicht der Bodenbiologie. Bodenschutz 2/09, S. 52-58

371. Williams, M.A.; Rice, C.W. — Seven years of enhanced water availability influences the physiological, structural, and functional attributes of a soil microbial community. Applied Soil Ecology 35 (2007), S. 535-545

372. Wischmeier, W. — Estimating the soil loss equation cover and management factor for undisturbed areas", Sediment Yield Works-hop Proc., Oxford Mss (1975)

373. Wischmeier, W. — Cropland erosion and sedimentation. – In: Steward, B., et al. (Hrsg.): Control of water pollution from cropland - Vol. I1 -An overview. USDA-EPA (1976), S. 31-58

374. Woodruff, N.P. Siddoway, F.H — A wind erosion equation. Proc. - Soil Sci. Soc. Am. 29 (1965), S. 602– 608

375. WPA — Analyse der Ursachen für das Sinken von Nitratbefrachtungen im Grundwasser. wpa Beratende Ingenieure GmbH, Wien (2003), S. 3-4

376. Wrage, N.; Lauf, J.; del Prado, A.; Pinto, M.; Pietrzak, S.; Yamulki, S.; Oenema, O.; Gebauer, G. — Distinguishing sources of N2O in European grasslands by stable isotope analysis. Rapid Communications in Mass Spectrometry 18 (2004), S. 1201-1207

377. Wurbs, D. (2005) — Vergleichende Untersuchungen zu den Folgewirkungen von Klima- und Landnutzungsänderungen auf den Wasserhaushalt in Flusseinzugsgebieten. Diss., Martin-Luther-Univ. Halle-Wittenberg, FG Geographie, Halle (2005)

378. Yamazaki, C.; Ishiga, H.; Ahmed, F.; Itoh, K.; Suyama, K.; Yamamoto, H. — Vertical Distribution of Arsenic in Ganges Delta Sediments in Deuli Village, Bangladesh, Soil Sci. Plant Nutr. 49 (2003), S. 567–574

379. Zak, D.R.; Holmes, W.E.; MacDonald, N.W.; Pregitzer, K.S. (1999) — Soil Temperature, Matric Potential, and the Kinetics of Microbial Respiration and Nitrogen Mineralization. Soil Science Society of America Journal 63 (1999), S. 575-584

380. Zebisch, M.; Grothmann, T.; Schröter, D.; Hasse, C.; Fritsch, U.; Cramer, W. — Klimawandel in Deutschland Vulnerabilität und Anpassungsstrategien klimasensitiver Systeme. Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung, im Auftrag des Umweltbundesamt, Dessau H. 08/05

381. Zhang, H.; Lindberg S. E.; Gustin, M.; Xu, X. (2003) — Toward a better understanding of mercury emissions from soils. In: Cai, Y.; Braids, O. C. [Eds.] (2003): Biogeochemistry of environmentally important trace elements. National meeting of the American Chemical Society. 01.04.-05.04.2001, San Diego, Calif. ACS symposium series 835 (2003), S. 246-261

382. Zhang, X.C. and M.A. Nearing — Impact of climate change on soil erosion, runoff and wheat productivity in central Oklahoma. Catena 61 (2005), S. 85-195

383. Zsolnay, A. (1996) — Dissolved Humus in Soil Waters. In: Piccolo, A. (Hrsg.) Humic Substances in Terrestrial Ecosystems. Elsevier. Amsterdam (1996), S. 171-223

ANLAGE 1 Bodenwissenschaftliche Forschung mit Bezug zum Klimaschutz

Bodenwissenschaftliche Forschung mit Bezug zum Klimaschutz

Zeiträume 2000-2005 und 2005-andauernd

F. Makeschin, M. Abiy

Bodenwissenschaftliche Forschung mit Bezug zum Klimaschutz

1. Untersuchungen des Projektes Orientierungsrahmen Bodenwissenschaften

Im Projekt Orientierungsrahmen konnten für den Forschungszeitraum 2000-2005 an Universitäten 30 Projekte von insgesamt 918 untersuchten Projekten dem Themenkreis Boden und Klima zugeordnet werden. Damit positioniert sich dieser Forschungsschwerpunkt mit einem Anteil von 3,3 % an den universitären Forschungsprojekten im unteren Mittel der untersuchten Projekte und Schwerpunkte (Abb. 1)

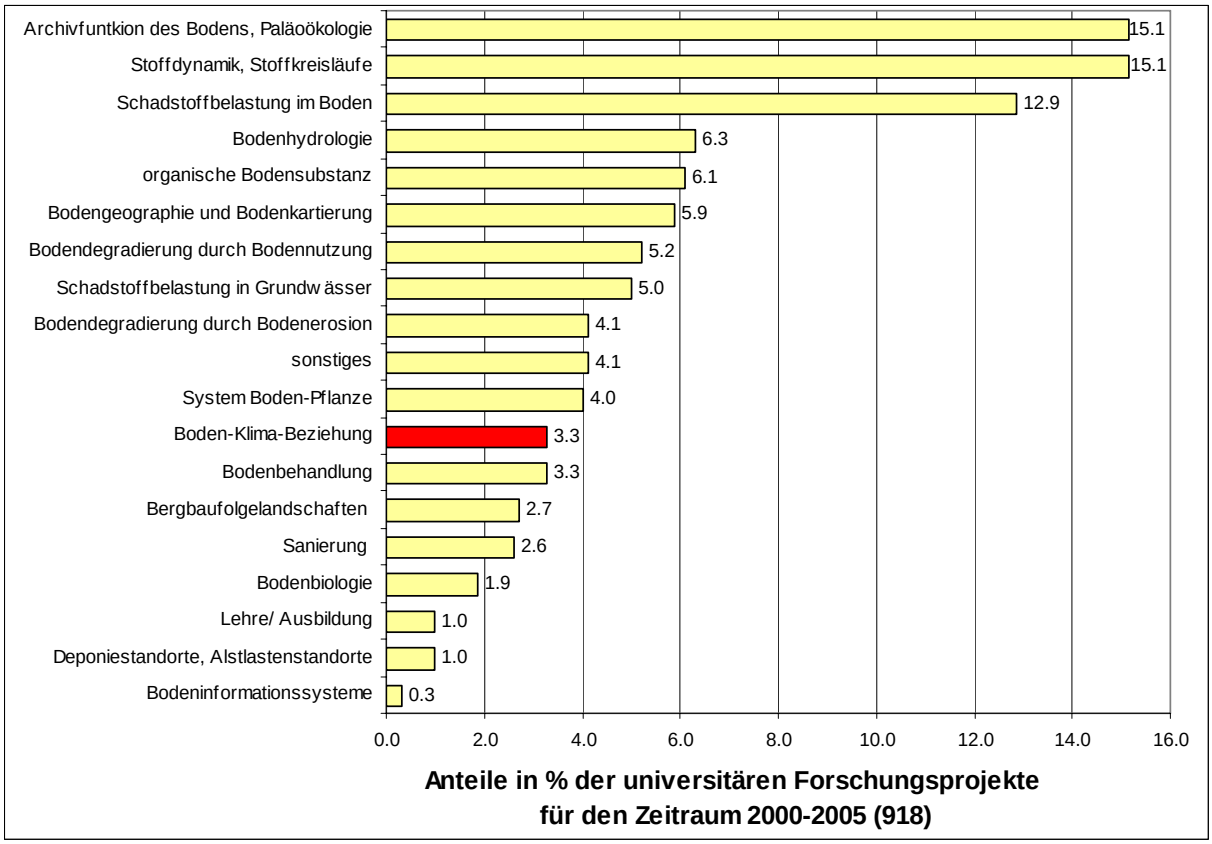


Abb. 1: Schwerpunkte der universitären Forschungsprojekte für den Zeitraum 2000-2005

Die Themen innerhalb dieser Projekte können in 3 Gruppen unterteilt werden. Auf der einen Seite erfolgten Untersuchungen zum Spurengasaustausch zwischen dem Boden und der Atmosphäre und damit letztlich des Einflusses des Bodens auf mögliche Klimaänderungen. Auf der anderen Seite werden Fragestellungen hinsichtlich des Einflusses von Klimaänderungen, beispielsweise des erhöhten CO2-Vorkommens, auf Landnutzungen und Bodenprozesse. Die erstgenannte Forschungsrichtung liegt dabei im Fokus mit 57% der 30 Projekte. Der Einfluss des Klimas auf den Boden war in 6 der 30 Projekte Gegenstand der Forschung. Etwa 23% der Projekte wiesen nur einen indirekten Bezug der bodenwissenschaftlichen Forschung zu Fragen der Klimaänderungen auf (vgl. Abb. 5a)

An der Forschung beteiligte Fachrichtungen waren in erster Linie die Agrarwissenschaften und Forstwissenschaften mit 47 % bzw. 30 % der Projekte (Abb. 2).

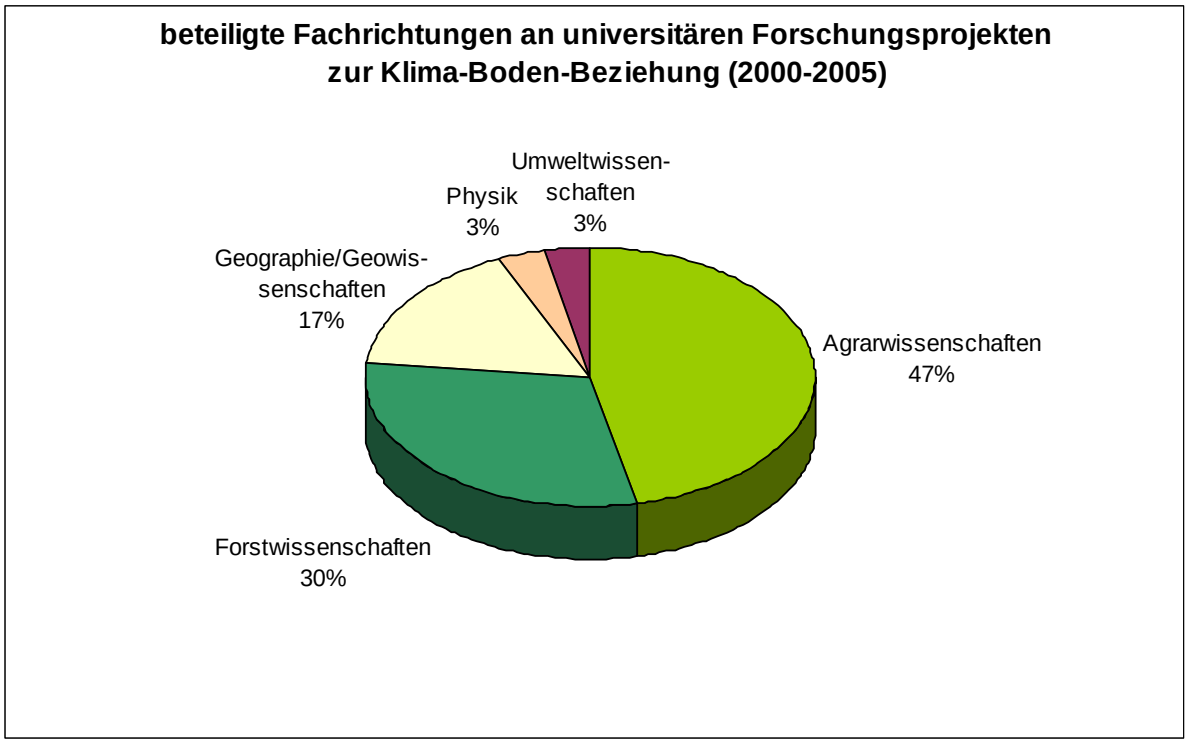
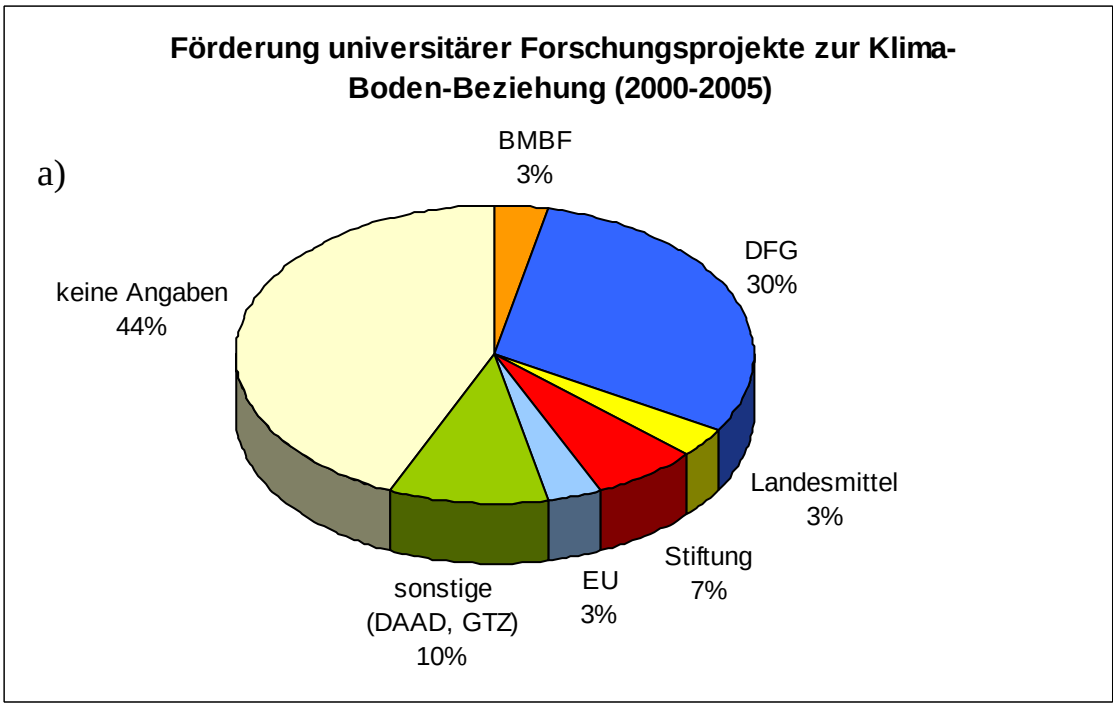


Abb. 2: beteiligte Fachrichtungen an den universitären Forschungsprojekten zum Schwerpunkt Klima und Boden (Orientierungsrahmen Bodenwissenschaften)

Die Förderung wurde in erster Linie durch die DFG sichergestellt. Weitere Förderinstitutionen waren neben dem BMBF und der EU vor allem Landesämter, der DAAD und Stiftungen. (Abb. 3).



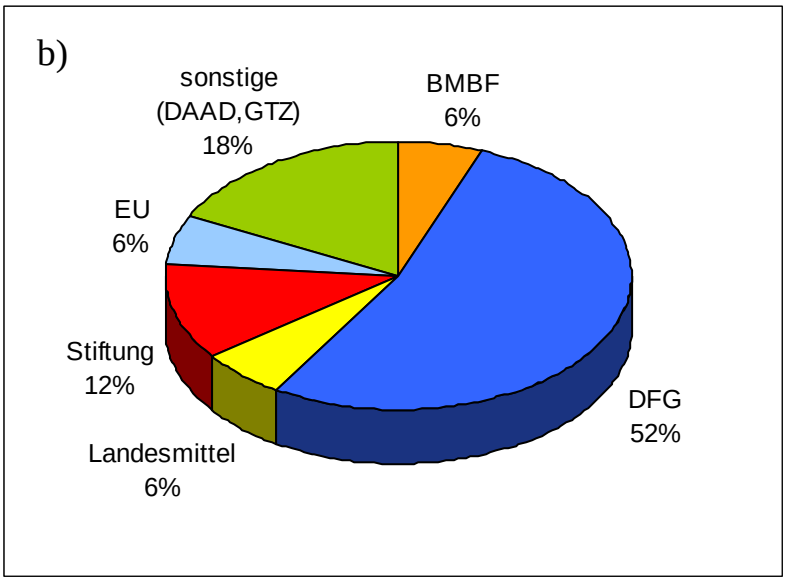


Abb. 3: Förderung der universitären Forschungsprojekte zum Schwerpunkt Klima und Boden; (b) abzüglich der Projekte ohne Angaben

2. Weitere Recherche

Zusätzlich zu den Ergebnissen aus dem Orientierungsrahmen wurde eine erneute Prüfung folgender Datenbanken durchgeführt: UFORDAT des UBA, GEPRIS der DFG, Datenbank der DBU sowie der Förderkatalog vom BMBF.

Für den Zeitraum 2000-2005 wurden insgesamt 26 Projekte gefunden. Durchführende Institutionen waren Universitäten (15 Projekte, 58%), deren Projekte nicht im Orientierungsrahmen erfasst wurden, außeruniversitäre Einrichtungen wie Großforschungseinrichtungen, Ressortforschungseinrichtungen und Landesinstitutionen (11 Projekte, 42 %). In den Folgejahren ab 2005 wurden 35 Projekte in den Datenbanken aufgeführt. Die Aufteilung der Projekte auf Universitäten (20 Projekte; 57 %) und außeruniversitäre Einrichtungen (15 Projekte; 43 %) entspricht dem vorangegangen Zeitraum.

Die beteiligten Fachrichtungen an der universitären Forschung entsprechen denen für die Projekte, welche im Orientierungsrahmen eingeflossen sind. Die Agrar- Forst- und Geowissenschaften spielen eine entscheidende Rolle für die Forschung in diesem Schwerpunkt in allen geprüften Zeiträumen (Abb. 4, vgl. Abb. 2).

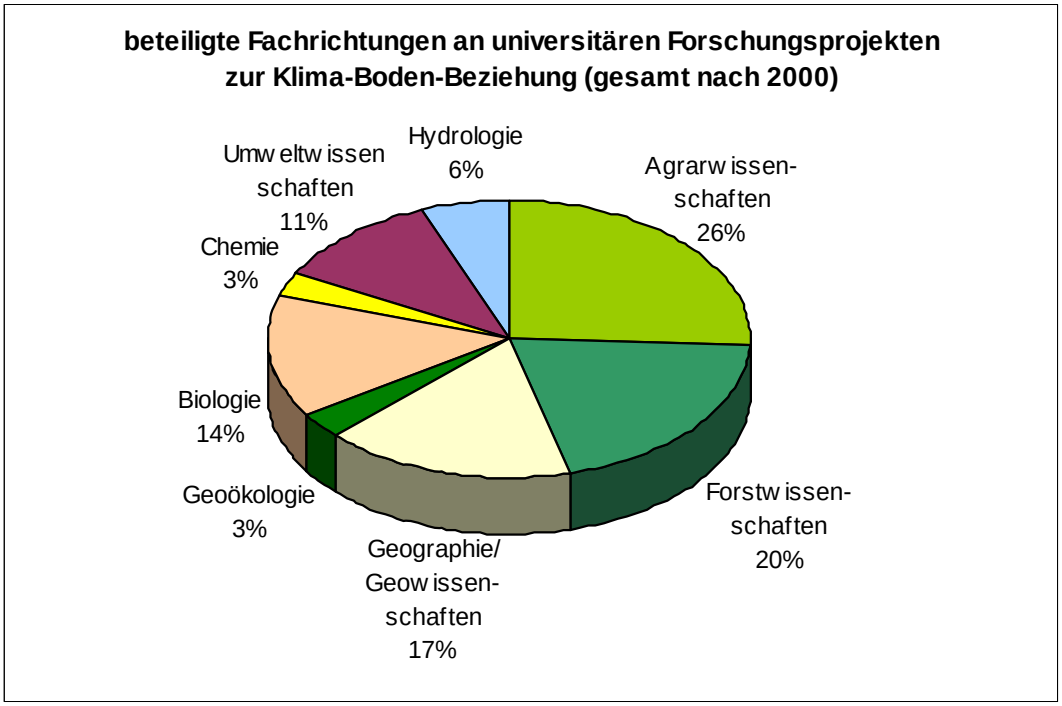


Abb. 4: beteiligte Fachrichtungen an den universitären Forschungsprojekten zum Schwerpunkt Klima und Boden (weitere Recherche)

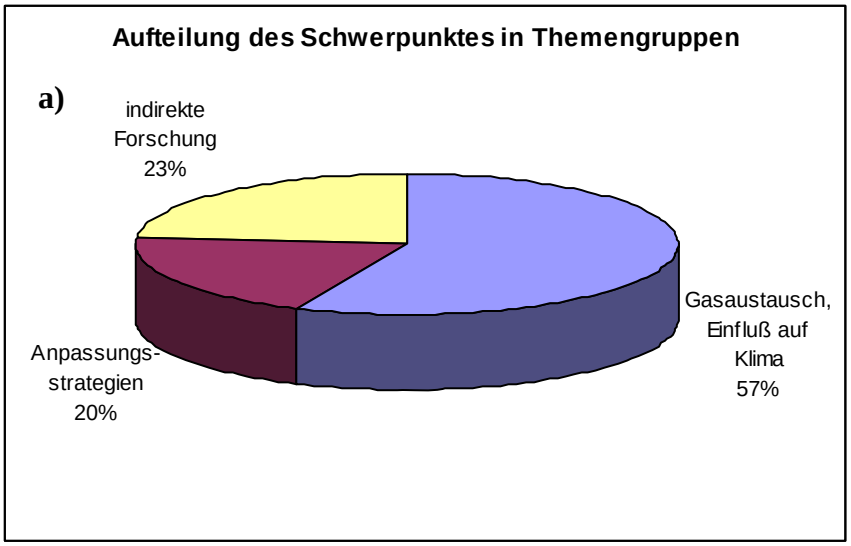
Wie für die im Orientierungsrahmen genannten Projekte konnte auch für die insgesamt nach 2000 gefundenen universitären Forschungsprojekte in den Datenbanken eine grobe Einteilung des Schwerpunktes in die 3 Gruppen (1) Gasaustausch zwischen Boden und Atmosphäre, (2) Einfluss des Klimas auf Landnutzung und Bodenprozesse und (3) Bodenforschung mit nur indirektem Bezug zum Klima gefunden werden. Der Fokus lag mit 52 % der Projekte auf den Themen zum Spurengasaustausch. In 11 % der Projekte insgesamt nach 2000 wurden mögliche Anpassungsstrategien aufgrund von Klimaänderungen (Gruppe 2) untersucht. 37 % der Projekte wiesen nur einen indirekten Bezug zum Klima auf. Damit ergibt sich ein vergleichbares Bild mit den Ergebnissen des Orientierungsrahmens.

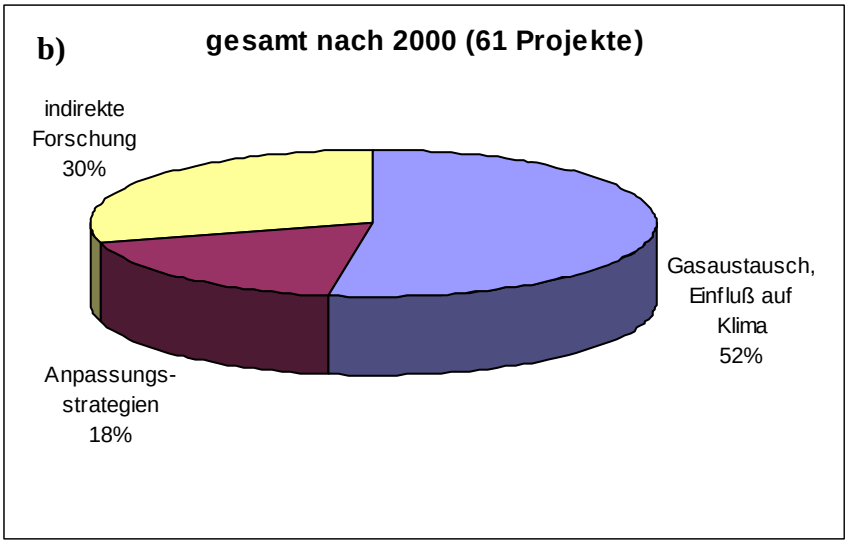
Außeruniversitäre Einrichtungen wiesen für den gesamten Zeitraum nach 2000 insgesamt 26 Projekte auf. Die Aufteilung in die genannten Themengruppen entspricht den Aufteilungen im Orientierungsrahmen und der universitären Projekte in den Datenbanken. Allerdings lässt sich hier ein leichter Anstieg in den Projektzahlen zur Themengruppe Anpassungsstrategien verzeichnen (siehe Abb. 5c).

Insgesamt ergeben sich allerdings nur geringfügige Unterschiede in den Themenaufteilungen zwischen den Projekten im Orientierungsrahmen und den gesamten Projekten der weiteren Recherche (Abb. 5a und 5b).

Die Förderung der Projekte weist ein ähnliches Bild auf wie die Förderung der im Orientierungsrahmen genannten Projekte. Dennoch lässt sich gegenüber den Ergebnissen im Orientierungsrahmen vor allem für den Zeitraum nach 2005 eine deutliche Zunahme der Förderung durch das BMBF (21% der Projekte in den Datenbanken) verzeichnen. Allerdings wurden im Orientierungsrahmen viele Projekte aufgeführt zu denen es keine Angaben zur Förderung gab. Es wäre also denkbar, dass hierunter einige Projekte mit Förderung durch das BMBF fallen (Abb. 6, vgl. Abb. 3)

Insgesamt stützen die Ergebnisse der erneuten Recherche das Bild des Orientierungsrahmens zu dem untersuchten Forschungsschwerpunkt. Unterschiede zwischen den Zeiträumen in der Themenwahl sind nur minimal, so dass sich kaum Trends abzeichnen. Allerdings scheinen Fragestellungen zu Anpassungsstrategien an sich ändernde Klimabedingungen an Bedeutung in der Forschung besonders an außeruniversitären Einrichtungen zuzunehmen.





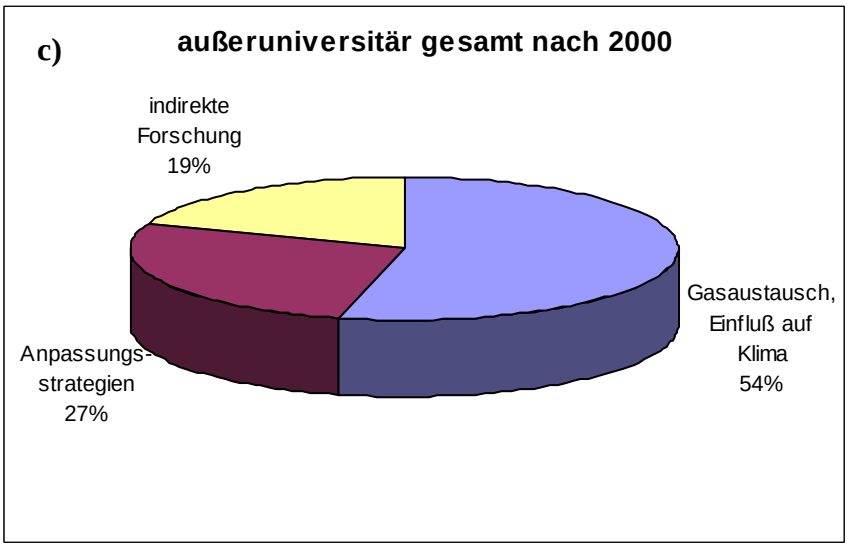


Abb. 5: Aufteilung des Schwerpunktes in Themengruppen; a) Orientierungsrahmen Bodenwissenschaften; b) gesamte Projekte nach 2000 (weitere Recherche); c) Projekte außeruniversitärer Einrichtungen nach 2000 (weitere Recherche)

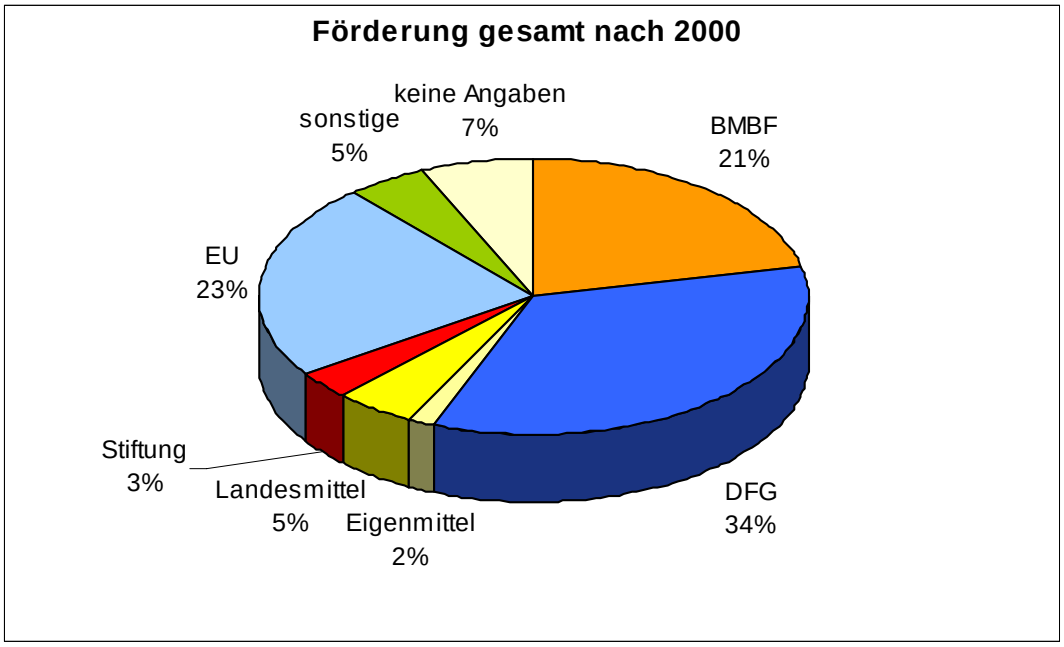


Abb. 6: Förderung der gesamten Forschungsprojekte nach 2000 zum Schwerpunkt Klima und Boden (weitere Recherche)

ANLAGE 2 Vertiefende Informationen zum nichtstofflichem Bodenzustand und -prozessen

Anlage 2.1 USLE/ ABAG, RUSLE/ dABAG (Universal Soil Loss Equation)

A = R * K * L * S * C * P

Regen- und Oberflächenabflussfaktor R

- Niederschlag (aufsummierte kinetische Energie (E) jedes erosiven Einzelregens und maximale 30-Minuten-Intensität (I_{30}))
- Schneeschmelze wird nicht berücksichtigt

Bodenerodierbarkeitsfaktor K

wird errechnet

- aus der Bodenart (Schluff + Feinstsand + Sand)
- aus dem Gehalt an organischer Substanz
- Aggregatklasse in der Ackerkrume (z. B. nach KA5)
- Durchlässigkeitsklasse (z. B. nach KA5 Tab. 80)

Topographie L * S

- erosive Hanglänge des gesamten erosiven Hanges oder des Hangabschnittes
- Hangneigung des gesamten erosiven Hanges oder des Hangabschnittes

Bodenbedeckungs- und Bearbeitungsfaktor C

- Bodenbedeckung
- Bodenbearbeitung
- wird mit entsprechendem R-Faktor der Periode korrigiert, da C-Faktor periodisch veränderlich ist

Anlage 2.2 EROSION 3D/2D

Niederschlag

- Niederschlagsdauer des Gesamtereignisses
- Niederschlagsintensität je Zeitintervall (Auflösung 1 bis 15 min)

Relief

- Hanglänge von der lokalen Wasserscheide bis zur Tiefenlinie bzw. des betrachteten Hangabschnitts bei gegliedertem Hangprofil
- Hanggeometrie: x-, y-, z-Koordinate aller das Hangprofil (EROSION 2D) oder Einzugsgebiet (EROSION 3D) beschreibenden Höhenpunkte

Bodenbedeckung

- Pflanzenbedeckungsgrad;
  alternativ:
  - Nutzungs- bzw. Fruchtart
  - Monat im Jahresverlauf

Infiltrationsrate;

alternativ:

- Anfangsbodenfeuchte des obersten Horizonts (in 25 cm Bezugstiefe)

- Korngrößenverteilung des obersten Horizonts in mindestens 3, idealerweise 9 Fraktionen
- Trockenrohdichte des obersten Horizonts (in 25 cm Bezugstiefe)
  (kann ggf. aus anderen Eingangsdaten geschätzt werden)
- Gehalt an organischem Kohlenstoff des obersten Horizonts
- Bearbeitungszustand des obersten Horizonts

Rauhigkeitsbeiwert der Bodenoberfläche
(alternativ nach GARBRECHT oder MANNING);

Rauhigkeitsbeiwert nach GARBRECHT:

- Korngrößenverteilung des obersten Horizonts (bei Sandböden)
- Aggregatgrößenverteilung des obersten Horizonts (bei allen anderen (aggregierten) Böden)

Rauhigkeitsbeiwert nach MANNING

- Nutzungs- bzw. Fruchtart
- Bearbeitungszustand des obersten Horizonts
- Erosionswiderstand der Bodenoberfläche, gemessen als Scherwiderstand bei Wassersättigung
  alternativ:
  - Bodenart des obersten Horizonts
  - Bearbeitungszustand des obersten Horizonts

vom Modell als konstant angenommene, nicht zu variierende Eingangsdaten:

- Erdbeschleunigung
- Flüssigkeitsdichte des Niederschlags
- Flüssigkeitsdichte des Abflusses
- Flüssigkeitsviskosität des Abflusses
- mittlerer Partikeldurchmesser je Korngrößenfraktion
- Partikeldichte je Korngrößenfraktion
- Depositionskoeffizient

vom Anwender individuell veränderbare Steuergrößen:

- Länge und Breite je Hangsegment
- Dauer je Zeitintervall
- Zahl der Fraktionen der Korngrößenverteilung

Anlage 2.3 WEQ

Boden
- Aggregatgrößenverteilung
- Bodenfeuchte
- Humusgehalt
- Krusten

Vegetationsbedeckung (Biomasse, kg/m² Trockenmasse)

Rauhigkeit der Bodenoberfläche

Gelände
- Länge des ungeschützten Feldes in Richtung des vorherrschenden Windes

Klimaindex
- Windgeschwindigkeit
- Feuchtigkeit der Oberfläche
- Verdunstung

Anlage 2.4 WEELS

Bodenerodibilität
- Korngroßenverteilung
- Bodentaxonomie (KA 4)

Landnutzung
- Landnutzungsstatistik
- Fruchtfolge

Rauhigkeit der Bodenoberfläche
- Aktuelle Vegetation
- Art der Bodenbearbeitung

Wind
- Windgeschwindigkeit
- Geländerauhigkeit (ATKIS, CORINE)
- Relief

Winderosivität
- Windbarriere (Höhe, Dichte usw.)

Bodenfeuchte
- Niederschlag
- Lufttemperatur
- Luftfeuchte
- Globalstrahlung
- Windgeschwindigkeit
- Aktuelle Landnutzung

Anlage 2.5 Relevanz der zeitlichen Auflösung von Parametern

Parameter	Zeitliche Auflösung
Bodenart	nicht relevant
Humusgehalt	relevant
Relief	nicht relevant
Bodenbedeckung	sehr relevant
Niederschlag	sehr relevant

Anlage 2.6 Parameter und Eignung von Mess- und Erhebungsaktivitäten

Datenquelle	Für die Erosionsmodellierung relevante Parameter	Eignung
BDF	▪ Bodenphysikalische Parameter: Korngrößen (Schluff, Sand, Ton; z.T. gS, mS, fS, ffS, gU, mU) , Dichte (Lagerungsdichte, Trockenrohdichte, Festsubstanzdichte), pF-Wert, Wasserleitfähigkeit kf, Wassergehalt (vol/grav), Aggregatstabilität, Humusgehalt ▪ C_{org}	Die Parameter sind zwar sehr gut geeignet, die Daten liegen aber plotbezogen vor, so dass sie sich für eine flächenhafte Aussage nicht eignen → Ausnahme: BDF, auf denen Bodenerosionskartierung durchgeführt wird
BZE I und II	▪ C_{org}	Siehe BDF. Zum anderen werden die für die Modelle wichtigen bodenphysikalischen Parameter nicht bestimmt. BZE-Beprobung findet auf Waldstandorten statt, die in i.d.R. nicht erosionsgefährdet sind.
ICP Forest: Level I + II	▪ Bodenfeuchte ▪ Körngrößenverteilung ▪ Trockenrohdichte ▪ C_{org}	siehe BZE
Dauerfeldversuche	▪ physikalische Bodeneigenschaften: Trockenrohdichte, Körngröße ▪ C_{org}	Eher nicht geeignet, da die Daten nur punktuell vorliegen.

Vorhandene Erosions-messugen der Bundesländer	i.d.R. alle für das jeweilige Modell vorgesehenen Parameter	Die Daten sind für die Validierung von Modellen von größerer Bedeutung, so dass die Erstellung einer Metadatenbank über diese Daten zu empfehlen ist.
Bodenschät-zungs-daten	▪ Bodenart (Körnungsklassen): Unterteilung in Sand, anlehmi-ger Sand, stark lehmiger Sand, sandiger Lehm, Lehm, schwerer Lehm, Ton und Moor --> nicht veränderlich ▪ Humusgehalt: veränderlich	Die Daten sind eher geeignet, da diese mit höheren Punktdichten vorliegen. Es gibt bereits Methoden zu Einbindung der Bodenschätzungsdaten zur Ableitung des K-Faktors für die ABAG. Die Qualität der digital vorliegenden Daten ist sehr unter-schiedlich. Weiterhin liegen die Boden-schätzungsdaten nicht in allen Bundes-ländern digital vor.
Daten und Kartenwerke zu Boden, Relief u. Bo-dennutzung	▪ Bodenart ▪ Humusgehalt ▪ Bodenbedeckung	Generell eher geeignet, da die Daten i.d.R. generalisiert vorliegen.

Anlage 2.7 Erosionsmessprogramme in den Bundesländern:

- Saarland: Im Jahr 1994 wurde im Saarland eine Erosionsmessstation mit drei Versuchsparzellen eingerichtet
- Bayern: Von 1975 - 2003 wurden auf ca. 450 Standorten im Alpenraum Starkregenereignisse erzeugt und Erosionen gemessen. Zusätzlich werden seit 1985 an sechs Ackerstandorten mit einer Hangneigung von >= 5 % unter verschiedenen Standort- und Bewirtschaftungsbedingungen quantitative und qualitative Messungen zum Oberflächenabfluss, Boden- und Nährstoffaustrag durchgeführt (JORDAN et al. 2004).
- Sachsen: Von 1992 bis 1996 wurden im Bodenerosionsmessprogramm 132 Großberegnungsversuche auf 85 verschiedenen Plots durchgeführt
- Niedersachen: Zur Abschätzung und Beurteilung des Ausmaßes der Bodenerosion auf landwirtschaftlich genutzten Flächen werden fünf zusammenhängende Referenzflächen zwischen 33 und 106 ha seit dem Jahr 2000 regelmäßig beobachtet und alle Erosionsereignisse erfasst (MOSIMANN et al. 2009).

ANLAGE 3 Poster „Bodendaten in der Klimafolgen- und Klima-anpassungsforschung“

BOKLIM
Bodendaten in der Klimaforschung

Bodendaten in der Klimafolgen- und Klimaanpassungsforschung

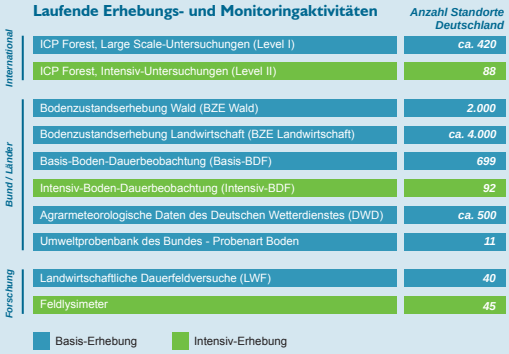
Ergebnisse zu Datenbedarf, -einsatz und -bereitstellung aus dem BOKLIM-Vorhaben, FKZ 3708 71 205 01

Für die Umsetzung der Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel (DAS) für das Schutzgut Boden sind belastbare Daten und zuverlässige Zeitreihen über die langfristigen Veränderungen des Bodenzustands und der Bodenfunktionen erforderlich. Die Instrumente des Bodenmonitorings und der Erfassung des Bodenzustands stellen dabei unerlässliche Datengrundlagen dar.

Vielzahl an Aktivitäten – wenig Vernetzung

In Deutschland bestehen dauerhaft eingerichtete Monitoringprogramme mit repräsentativen Standorten und es finden regelmäßig rasterbasierte Erhebungen des Bodenzustands statt (s. Abb. rechts). Die Programme arbeiten in unterschiedlichem Maß nach abgestimmten Grundsätzen. Informationen über die Bodendaten sind gegenwärtig uneinheitlich und liegen verteilt an vielen Stellen vor.

BOKLIM hat Informationen zu den Messprogrammen und -aktivitäten in Steckbriefen zusammengestellt:
► Broschüre „Mess- und Erhebungsaktivitäten für Böden in Deutschland“



Geeignete Daten als Beitrag für viele Fragestellungen

Im BOKLIM-Vorhaben wurde die Eignung von Mess- und Erhebungsdaten für Böden erstmals übergreifend für die bundesweit betriebenen Messprogramme und -aktivitäten bewertet. Geprüft wurden dabei u.a. das Parameterspektrum und die Anwendung in Modellen.

Parameter zur Messung von klimabedingten Änderungen des Bodenzustands (Auszug*)

Prozesse	Parameter	In welchen Programmen wird der Parameter untersucht?
Wärmehaushalt	Bodentemperatur in verschiedenen Horizonten (z.B. in °C)	DWD, Intensiv-BDF, ICP Level II, z.T. Feldlysimeter
Sickerwasserfluss und Wasserspeicherung	Bodenwassergehalt / Bodenfeuchte in verschiedenen Horizonten (z.B. in Vol.-% oder mm)	Intensiv-BDF, ICP Level II, LWF, DWD, Feldlysimeter
	Sickerwasserrate, Grundwasserneubildungsrate (z.B. mm)	Intensiv-BDF, ICP Level II, Feldlysimeter, DWD
	Grundwasserflurabstand (z.B. in m u. GOK)	z.T. Basis-BDF, Intensiv-BDF, ICP Level II
Bodenerosion	Bodenabtrag (z.B. in t/ha * a)	wenige Intensiv-BDF (mit unterschiedlichen Ansätzen)
Veränderungen der Bodenfauna	Regenwürmer und mindestens eine Indikatorgruppe der Mesofauna (Artenspektrum, Abundanz, Dominanz und Frequenz der Arten)	Basis-BDF, Intensiv-BDF, in Einzelfällen ICP Level I/BZE Wald u. LWF

* Betrachtet wurden auch Abbau und Anreicherung von organischer Substanz und Nährstoffen, Spurengashaushalt/-emissionen, bodenmikrobielle Veränderungen, Abbau und Anreicherung von Schwermetallen und organischen Schadstoffen sowie Bodenverdichtung.

Eingangsdaten zur Modellkalibrierung und -validierung aus Mess- und Erhebungsaktivitäten (Auszug*)

Modelltyp	Parameter (-gruppen)	Geeignete Bodendaten
Klimamodelle	Bodentemperatur Bodenfeuchte Kohlenstoffgehalt	DWD; z.T. LWF, Intensiv-BDF, ICP Level II-Standorte, Feldlysimeter
	Eiswassergehalt	-
Bodenerosionsmodelle	Modellspezifische Eingangsdaten zu Infiltrationsrate und Rauhigkeit: Physikalische Basisparameter	LWF, Basis-BDF, Intensiv-BDF, ICP Level I / BZE Wald, ICP Level II
	Flächendaten einschl. detaillierter Landnutzungsdaten	Keine (vielmehr Bodenkarten, Bodenschätzung und andere Datenquellen)
	Ergebnisse von C-Modellen	andere Datenquellen
Bodenwasserhaushalts-modelle	Bodenart, Bodentemperatur, Bodenfeuchte, Sickerwasser, Grundwasserflurabstand (kapillarer Aufstieg)	DWD, LWF, Intensiv-BDF, ICP Level II, Feldlysimeter, Level I / BZE Wald II
	Lateraler Zufluss	-

* Betrachtet wurden auch Modelle für den Stoffhaushalt und die stofflichen Bodenbelastung, Bodenverdichtung, Bodenmikrobiologie, klimarelevante Gase und Landnutzungsmodelle.

Künftiges Messen und Erheben erfordert Strategien und Entscheidungen

Es wird weiterhin und vermehrt ein Bedarf an Bodendaten bestehen, um im Rahmen der DAS die Wirkung von Klimaänderungen auf die Böden zu beurteilen. Auch um die Wirkung und den Erfolg von Bodenschutz- und Klimaschutzmaßnahmen sowie Rückkopplungseffekte von im Boden ablaufenden Prozessen auf das Klima zu bewerten, sind Bodendaten erforderlich. BOKLIM hat Handlungsempfehlungen für künftige Mess- und Erhebungsaktivitäten ausgearbeitet, die sich an Bundes- und Landesbehörden sowie Forschungsinstitutionen richten.

Allgemeine Empfehlungen

- Einrichtung eines ständigen Koordinierungsgremiums und Benennung von Ansprechpartnern sowie von ständigen Fachausschüssen zur Förderung bestehender Abstimmungsprozesse
- Regelmäßige, ressortübergreifende Arbeitsgespräche zur Weiterentwicklung von Datenerhebung, -auswertung und -bereitstellung
- Einrichtung einer Informationsplattform für Bodendaten im Internet
- Vereinbarungen für eine einheitliche Dokumentation und Bereistellung von Metadaten sowie für eine standardisierte Datenbereitstellung
- Durchführung von Repräsentanzanalysen und abgestimmte Parameterauswahl

Konkrete themenspezifische Empfehlungen (Auszug)

- Messung bodenhydrologischer Kenngrößen langfristig und hochauflösend mit einheitlichen Methoden an allen Intensiv-BDF; Aufnahme der Messung von mobilen Stofffraktionen
- Erfassung aller Regenwürmer und einer Gruppe der Mesofauna auf BDF aller Bundesländer; Fortsetzung der bodenzoologischen Untersuchungen auf bereits untersuchten Flächen
- Verkürzung der Messabschnitte für mikrobiologische Kennwerte, insbesondere auf Intensiv-BDFe, um saisonale Entwicklungen erfassen zu können
- Monitoring der Erosion in ausgewählten Agrarregionen unter Berücksichtigung von Klima, Geomorphologie, Boden
- Etablierung und Instrumentierung von ca. 10 – 15 ausgewählten, regional repräsentativen Standorten (ICP-Level-II/ Intensiv-BDF) zur kontinuierlichen Messung der Spurengasdynamik
- Integration bestehender bzw. Etablierung neuer landwirtschaftlicher Dauerfeldversuche zur langfristigen Untersuchung komplexer Zusammenhänge zwischen Bewirtschaftungssystemen und Bewirtschaftungsintensität

Ansprechpartner:
Umweltbundesamt Dessau, Jeannette Mathews, II2.7@uba.de
ARGE BOKLIM, Carolin Kaufmann-Boll, c.kaufmann@ahu.de

Materialien

Beiträge des BOKLIM-Workshops am 29./30.9.2009: UBATEXT 29/2010.
Abschlussbericht: UBATEXT (voraussichtlich 2011)
Broschüre „Mess- und Erhebungsaktivitäten für Böden in Deutschland“ (voraussichtlich 2011)

Umwelt Bundes Amt – Für Mensch und Umwelt

Das Projekt wird vom Umweltbundesamt (UBA) aus Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) finanziert.

ahu AG · Bergische Universität Wuppertal · BGR Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Geozentrum Hannover · IFAB Institut für Angewandte Bodenbiologie GmbH · Technische Universität Dresden

Quelle: ARGE BOKLIM Carolin Kaufmann-Boll; Wolfgang Kappler; Dr. Silvia Lazar; Dr. Georg Meiners; Dr. Rainer Baritz; Dr. Olaf Düwel; Dr. Rainer Hoffmann; Dr. Jens Utermann; Prof. Dr. Franz Makeschin; Dr. Mengistu Abiy; Prof. Dr. agr. Jörg Rinklebe; Carsten Schilli; Dr. Anneke Beylich; Ulfert Graefe.

Satz + Layout: ahu AG, Aachen

ANLAGE 4 Vorschlag BOKLIM-Metadatenprofil

M	**Mandatory (verpflichtend)**
C	**Conditional (bedingt verpflichtend)**
O	**Optional**
X	**Metadatenelement ist vorhanden (nicht differenziert als M, C, O)**
(X)	**Metadatenelement ist in Diskussion (nicht differenziert als M, C, O)**

BOKLIM-Metadatenprofil für Datensammlungen/Datenbanken aus Bodenmonitoring und Bodenzustandserhebung								**ISO/INSPIRE**		**GS Soil**		**PortalU**	
Nr.	**Boklim Vorschlag (Name gemäß deutsche Übersetzung ISO bzw. INSPIRE)**	**Bemerkungen, *Beispiele***	**BOKLIM**	**ISO 19115**	**INSPIRE CORE**	**GS Soil**	**Portal U**	**ISO 19115 No.**	**INSPIRE No.**	**GS Soil Metadata Regulation Secton**	**GS Soil Metadata Element**	**InGrid-Tabelle**	**InGrid-Feld**
1) Informationen zum Metadatensatz													
1	**Metadatensatzidentifikator**	eindeutiger Identifikator für diesen Metadatensatz als Freitext. *Beispiele:* *BDF-BRD, BDF-NI, BDF-064*	O	O			O	2				t01_object	obj_uuid
2	**Metadaten-Sprache**	zur Dokumentation der Metadaten verwendete Sprache gemäß INSPIRE und ISO 639-2/B. *Beispiele:* *ger, eng*	M	C	M	M	M	3	10.3	10.3	Metadata language	t01_object	metadata_language_key
3	**Metadaten-Zeichensatz**	exakte Bezeichnung des Zeichencodestandards, der im Metadatensatz verwendet wird; Auswahlliste. *Beispiel:* *UTF8*	C	C		C	C	4		4.1.3	Character Encoding	t01_object	metadata_character_set
4	**Metadaten-Verantwortliche Stelle**	*Beispiele:* *Umweltbundesamt, Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie Niedersachsen*	M	M	M	M	M	8	10.1	10.1	Metadata point of contact	t02_address	responsible_uuid
5	**Datum der Erstellung des Metadatensatzes**	Datum gemäß ISO 19103. *Beispiel:* *2009-08-31*	M	M	M	M	M	9	10.2	10.2	Metadata date	t02_address	create_time
6	**Bezeichnung des Metadatenstandards**	Bezeichnung des verwendeten Metadatenstandards (einschl. Profilname). *Beispiele:* *ISO 19115 (mit Metadatenprofil für Bodendaten UBA Deutschland, noch festzulegen)*	O	O			O	10				t01_object	metadata_standard_name
7	**Version des Metadatenstandards**	Version des verwendeten Metadatenstandards bzw. des genutzten Profils. *Beispiel:* *ISO 19115: 2003*	O	O			O	11				t01_object	metadata_standard_version
2) Datensatzbeschreibung													
8	**Name der Ressource**	*Beispiele:* *Boden-Dauerbeobachtung in Deutschland, Boden-Dauerbeobachtung in Niedersachsen, Boden-Dauerbeobachtungsfläche Nr. 064*	M	M	M	M	M	360	1.1	1.1	Resource title	t01_object	obj_name

BOKLIM-Metadatenprofil für Datensammlungen/Datenbanken aus Bodenmonitoring und Bodenzustandserhebung								ISO/INSPIRE		GS Soil		PortalU	
Nr.	**Boklim Vorschlag (Name gemäß deutsche Übersetzung ISO bzw. INSPIRE)**	**Bemerkungen, *Beispiele***	**BOKLIM**	**ISO 19115**	**INSPIRE CORE**	**GS Soil**	**Portal U**	**ISO 19115 No.**	**INSPIRE No.**	**GS Soil Metadata Regulation Secton**	**GS Soil Metadata Element**	**InGrid-Tabelle**	**InGrid-Feld**
9	**Kurzbeschreibung**	In der Beschreibung sollte angegeben werden: Anzahl Untersuchungsstandorte, untersuchte Landnutzung(en); Verknüpfung mit anderen Messnetzen; In GS Soil-Entwurf werden räumliche und inhaltliche Angaben in einer festen Struktur im Abstract-Metadatenelement angegeben (HTML-Erfassung). *Beispiel: Die Boden-Dauerbeobachtung in Deutschland umfasst 699 Basisbeobachtungsflächen und 95 Intensivbeobachtungsflächen auf Acker, Grünland, Forst und Sonderkulturen, z.T. auch Siedlungsbereich oder Sonstige Nutzungen in den Bundesländern (außer Berlin, Bremen). Verknüpfungen bestehen teilweise mit ICP Forest-, Luft-, Grundwasser-, WRRL- und FFH-Messnetzen.*	M	M	M	M	M	25	1.2	1.2	Resource abstract	t01_object	obj_descr
10	**Ressourcenart**	dataset, series oder service. *Beispiel: series*	M	C	M	M	M	6	1.3	1.3	Resource type	t011_obj_geo	hierarchyLevel
11	**Zweck der Ressource**	Zusammenfassung, für welchen Zweck oder mit welcher Absicht die Ressource erstellt wurde (andere Bedeutung als im Steckbrief). *Beispiele: Auswertung Humuszustand unter veränderten Klimabedingungen, Online-Veröffentlichung, Jahresbericht Umweltbeobachtung*	O	O			O	26				t015_legist	legist_value, info_note
12	**Bearbeitungsstatus der Ressource**	Auswahlliste. *Beispiele: abgeschlossen, historisches Archiv, kontinuierliche Aktualisierung, in Erstellung*	O	O			O	28				t01_object	time_status
13	**Schlüsselwort**	*Beispiele: Boden, Monitoring, Bodenzustand, Bodenzustandserhebung, Klimafolgenmonitoring, Bodenschutz*	M	O	M	M	M	33	3.1	3	Keyword		
14	**Räumliche Auflösung**	Angaben über die räumliche Auflösung der geografischen Informationen (nur bei Karten oder Rasterdaten, dann Maßstab oder Rasterweite).	C	O	C	C	M	38; 60	6.2	6.2	Spatial resolution	t011_obj_geo_scale	scale
15	**Sprache der Ressource**	Im Datenbestand verwendete Sprache. *Beispiele: ger, eng*	C	M	C	C	M	39	1.7	1.7	Resource language	t01_object	data_language_key
16	**Zeichencodestandard der Ressource**	Exakte Bezeichnung des Zeichencodestandards, der im Datenbestand verwendet wird. *Beispiel: UTF8*	C	C		C	O	40		4.1.3	Character Encoding	t01_object	dataset_character_set

BOKLIM-Metadatenprofil für Datensammlungen/Datenbanken aus Bodenmonitoring und Bodenzustandserhebung								ISO/INSPIRE		GS Soil		PortalU	
Nr.	**Boklim Vorschlag (Name gemäß deutsche Übersetzung ISO bzw. INSPIRE)**	**Bemerkungen, *Beispiele***	**BOKLIM**	**ISO 19115**	**INSPIRE CORE**	**GS Soil**	**Portal U**	**ISO 19115 No.**	**INSPIRE No.**	**GS Soil Metadata Regulation Secton**	**GS Soil Metadata Element**	**InGrid-Tabelle**	**InGrid-Feld**
17	**Themenbereich**	*Beispiele: Landwirtschaft, Biologie, Grenzen, Atmosphäre, Wirtschaft, Höhenangaben, Umwelt, Geowissenschaften, Gesundheitswesen etc.*	M	M	M	M	M	41	2.1	2.1	Topic category	t011_obj_topic_cat	topic_category
18	**Nutzung der Ressource**	Kurze Beschreibung, auf welche Art und Weise die Ressource zur Zeit verwendet wird. Der Bedarf über den Themenbereich hinaus ist zu prüfen. *Beispiel: Planung adäquater Schutz- und Anpassungs-maßnahmen (politisch und fachlich); Frühwarnsystem für schädliche Bodenveränderungen; Definition von Maßstäben für tolerierbare/zulässige Stoffeinträge; Klimamodellevaluierung; Beantwortung von Fragen im Zusammenhang mit der Beobachtung der Humusvorräte in Böden.*	O	O		X	O	63		Abstract 2.3	Related usage topic: 2.3.1. Related Soil Threaths; 2.3.2. Related uses	t01_object	dataset_usage
3) Einschränkungen													
19	**Anwendungseinschränkung**	Einschränkungen, die die Eignung der Ressource oder Metadaten betreffen. *Beispiel: nicht für Navigationszwecke geeignet*	M	O	M	M	M	68	8.1	8.1	Conditions for access and use	object_access	terms_of_use
20	**Zugriffs- und Nutzungseinschränkungen**	Zugriffseinschränkungen, Nutzungseinschränkungen, Andere Einschränkungen, Sicherheitseinstufung, Erläuterung, Einstufungssystem, Verwendungshinweis. *Beispiel: Die Datenverfügbarkeit liegt in der Verantwortung der betreibenden Länder. Die fachlich berührten Behörden erhalten entweder direkten Zugang zu den Bodeninformationssystemen (z.B. Bayern, Rheinland-Pfalz, Nordrhein-Westfalen) oder die Daten können regelmäßig (z.B. Schleswig-Holstein, Thüringen, Mecklenburg Vorpommern) oder auf Anforderung (z.B. Sachsen-Anhalt) bereit gestellt werden. Inhaltliche Rahmenbedingungen für den Datenaustausch mit dem Bund sind über die VwV (Datenaustausch) geregelt. Die technischen Rahmenbedingungen sind nicht geregelt. Die Öffentlichkeit erhält i. d. R. nur Zugriff auf aufbereitete Daten.*	M	C	M	M	M	70-77	8.2	8.2	Limitations on public access	object_access; t01_object	restriction_key; publish_id

BOKLIM-Metadatenprofil für Datensammlungen/Datenbanken aus Bodenmonitoring und Bodenzustandserhebung								ISO/INSPIRE		GS Soil		PortalU	
Nr.	**Boklim Vorschlag (Name gemäß deutsche Übersetzung ISO bzw. INSPIRE)**	**Bemerkungen, *Beispiele***	**BOKLIM**	**ISO 19115**	**INSPIRE CORE**	**GS Soil**	**Portal U**	**ISO 19115 No.**	**INSPIRE No.**	**GS Soil Metadata Regulation Secton**	**GS Soil Metadata Element**	**InGrid-Tabelle**	**InGrid-Feld**
4) Herkunft, Datenqualität, Pflege													
21	**Erläuterung zur Herkunft**	Allgemeine Aussagen des Datenerzeugers zur Herkunft des Datenbestands. *Beispiel: Export aus bBIS-BDF*	M	O	M	M	M	83	6.1	6.1	Lineage	t011_obj_geo	special_base
22	**Relative Positionsgenauigkeit**	Genauigkeitsangabe bezüglich einer als richtig akzeptierten Bezugs- oder Sollposition. *Beispiel: 1 m, 1000 m*	O	O		O	O	119		4.2.6	Data Quality – Positional accuracy – Absolute or external accuracy; Mean value of positional uncertainties (1D, 2D)	t011_obj_geo	rec_exact
23	**Konformität**	Konformitätsergebnis (Bestanden und Verfahrensspezifikation). Referenz auf die Produktspezifikation oder die Benutzeranforderung, anhand derer die Daten bewertet werden.	M	M	M	M	M	130-132	7	7	Conformity	object_conformity	degree_key
24	**Verantwortiche Institution(en)**	Alle beteiligten Institutionen können integriert werden (Rollen ISO: Anbieter, Verwalter, Eigentümer, Nutzer, Vertrieb, Urheber, Ansprechpartner, Projektleitung, Bearbeiter, Herausgeber, Autor); verpflichtend anzugeben sind Rolle, Kontaktperson, Organisation und e-mail-Adresse; optional Ort, Adresse, URL, FON). *Beispiele: Umweltbundesamt, Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie Niedersachsen jeweils mit Rolle, Kontaktperson und Adressen*	M	O	M	M	M	374-386; 388	9	9	Responsible organisation	t011_obj_literature; t021_communication	author u.a.
25	**Pflegeintervall der Ressource**	Intervall, in dem die Ressource nach ihrer Ersterstellung geändert oder ergänzt wird; Auswahlliste. *Beispiele: Jährlich, einmalig, unregelmäßig*	O	O			O	143				t01_object	time_period
5) Räumliche Datenstruktur, Referenzsystem													
26	**Darstellungstyp (Struktur der räumlichen Daten)**	Auswahlliste: Vector; Raster, Gitter; Text, Tabelle; TIN; Stereomodell; Video. *Beispiel: Vektor*	O	O		X	O	37; 156		4.2.1	Spatial representation type	t011_obj_geo_spatial_rep	type
27	**Typ der geometrischen Objekte**	Auswahlliste (Kompex, Komposit, Linie, Punkt, Fläche etc.). *Beispiel: Punkt*	M	M		(X)	O	184		Abstract 0.	Geometric Type of the database	t011_obj_geo_vector	geometric_object_type
28	**Anzahl/Dichte der Punkte (Punktanzahl/km2)**	*Beispiel: 0,1 / km²*	O	O		X		185		Abstract 0.1.2	Number/Density of the points		

BOKLIM-Metadatenprofil für Datensammlungen/Datenbanken aus Bodenmonitoring und Bodenzustandserhebung								ISO/INSPIRE		GS Soil		PortalU	
Nr.	**Boklim Vorschlag (Name gemäß deutsche Übersetzung ISO bzw. INSPIRE)**	**Bemerkungen, *Beispiele***	**BOKLIM**	**ISO 19115**	**INSPIRE CORE**	**GS Soil**	**Portal U**	**ISO 19115 No.**	**INSPIRE No.**	**GS Soil Metadata Regulation Secton**	**GS Soil Metadata Element**	**InGrid-Tabelle**	**InGrid-Feld**
29	**Identifikator des Referenzsystems**	Eindeutige Bezeichnung des Referenzsystems. *Beispiel: 25832: UTM32N ETRS89*	M	O		M	O	187		4.1.1	Coordinate Reference System	t011_obj_geo	referencesystem_value
6) Inhalt, Darstellungskatalog, Vertrieb													
30	**Dateninhalt, Objektartenkatalog, Darstellungskatalog u.a.**	Beschreibung des Inhaltes des Datenbestands, Information zum Objektartenkatalog oder zum konzeptionellen Schema u.a. *Beispiel: Objektartenkatalog für Bodendaten UBA Deutschland (noch zu entwickeln und festzulegen)*	O	O		?	O	232-269				t011_obj_geo	keyc_incl_w_dataset
31	**Technische Abgabebedingungen**	Abgabeeinheiten, Transfergröße (in Megabyte), Online-Quelle, Offline-Medien. *Beispiel: Layer Bundesland, 60MB, Link zum Download*	O	O		O	O	275-278		4.2.2	Online digital transfer options	t0112_media_option	transfer_size
32	**Datenformat_Dienstart**	Beschreibung des Formats, in dem die Daten bereitgestellt werden (Bezeichnung, Version, Revisionsnummer, Spezifikation, Dekompressionsmethode, Vertriebsstelle des Formats). *Beispiel: bBIS Version X*	M	O		M	M	32; 271; 285-289		4.1.2	Encoding	t011_obj_literature; t0110_avail_format	type_key; format_value; ver; specification; file_decompression_technique
7) Ausdehnung, Bibliographische Angaben und verantwortliche Stelle													
33	**Geografisches Begrenzungsrechteck**	*Beispiel: geografische Koordinaten Bundesrepublik Deutschland*	M	C	M	M	M	343-347	4.1	4.1	Geographic bounding box	spatial_ref_value	x1; x2: y1; y2
34	**Zeitbezug**	Datum und Zeit des Inhalts der Ressource. *Beispiele: Erstbeprobung 1990-1993, Gesamter Beobachtungszeitraum (1990 bis 2011)*	M	O	M	M	M	351	5.1	5	Temporal reference	t01_object	time_from
35	**Datum Erzeugung, Veröffentlichung oder Überarbeitung der Ressource**	Datum und Datumstyp. *Beispiel: 2001-05-20, Datum der Erzeugung*	M	M	M	M	M	394, 395	5.2	4.1.5	Reference date for the input data source of the described dataset.	object_conformity; t0113_dataset_reference	publication_date; reference_date

BOKLIM-Metadatenprofil für Datensammlungen/Datenbanken aus Bodenmonitoring und Bodenzustandserhebung								ISO/INSPIRE		GS Soil		PortalU	
Nr.	**Boklim Vorschlag (Name gemäß deutsche Übersetzung ISO bzw. INSPIRE)**	**Bemerkungen, *Beispiele***	**BOKLIM**	**ISO 19115**	**INSPIRE CORE**	**GS Soil**	**Portal U**	**ISO 19115 No.**	**INSPIRE No.**	**GS Soil Metadata Regulation Secton**	**GS Soil Metadata Element**	**InGrid-Tabelle**	**InGrid-Feld**
36	**Ressourcenverweis (Online ressource)**	Adresse für den Online-Zugriff unter Verwendung einer URL (Uniform Resource Locator) und Name des Portals. *Beispiel (fiktiv) : www.bodendaten.de/daten, Bodendatenportal Deutschland*	C	O	C	C	M	397; 400; 401	1.4	1.4	Resource locator	t017_url_ref	url_link; content; descr
8) Untersuchungsmethoden und Parameter													
37	**Probenahmemethode**	*Beispiele: simple (Einzelprobe gestört) or bulk (Einzelprobe ungestört) or average (Mischprobe)* Bewertung BOKLIM: vorläufig in Abstract beschreiben	-			(X)				Abstract 0.1.1	Method of sampling		
38	**Verteilung Probenahmestandorte**	*Beispiele: zufällig, systematisch oder Raster* Bewertung BOKLIM: ggf. verzichtbar, bei Bedarf in Abstract beschreiben	-			(X)				Abstract 0.1.3	Sampling locations		
39	**Anzahl Nicht-Bodenparameter**	in GS Soil non-soil variables like Groundwater level; Bewertung BOKLIM: ggf. verzichtbar, bei Bedarf in Abstract beschreiben	-			(X)				Abstract	Number of covariates		
40	**Anzahl Parameter**	Bewertung BOKLIM: ggf. verzichtbar, bei Bedarf in Abstract beschreiben	-			(X)				Abstract 2			
	für jeden Parameter:												
41	**Parameter-Name**	*Beispiele: TOC, Arsen, pH, kf* Bewertung BOKLIM: notwendig --> extended attribute	M			(X)	O			Abstract 2.1.1	Name of the variable	t011_obj_data_para	parameter
42	**Parameter-Untersuchungsmedium**	*Beispiele: Boden-Feststoff, Boden-Lösung* Bewertung BOKLIM: notwendig --> extended attribute	M										
43	**Parameter-Kategorie**	*Beispiele: Physikalische Bodeneigenschaften (Farbe, Morphologie, Textur, Poren, Wasserhaushalt, sonstige); Chemische Bodeneigenschaften (Azidität/Alkalität, Salze, KAK, SOM/SOC, Mineralogie, Nährstoffe, Schadstoffe); Biologische Bodeneigenschaften (Flora, Fauna, Pilze); Taxonomische Klassifikation (z.B. angeleht an GS Soil_Entwurf)* Bewertung BOKLIM: notwendig --> extended attribute	M			(X)				Abstract 2.1.2	General soil thematic categories of the variables		

BOKLIM-Metadatenprofil für Datensammlungen/Datenbanken aus Bodenmonitoring und Bodenzustandserhebung								ISO/INSPIRE		GS Soil		PortalU	
Nr.	**Boklim Vorschlag (Name gemäß deutsche Übersetzung ISO bzw. INSPIRE)**	**Bemerkungen, *Beispiele***	**BOKLIM**	**ISO 19115**	**INSPIRE CORE**	**GS Soil**	**Portal U**	**ISO 19115 No.**	**INSPIRE No.**	**GS Soil Metadata Regulation Secton**	**GS Soil Metadata Element**	**InGrid-Tabelle**	**InGrid-Feld**
44	**Parameter-Methode**	Name der Messmethode, Verweis auf entsprechende ISO-Norm. *Beispiel:* *DIN ISO 10 390: 2005* Bewertung BOKLIM: notwendig --> extended attribute; nach Möglichkeit um Probenahmemethode zu ergänzen.	M			(X)				Abstract 2.1.3	Name of methods for measurements, reference (ISO)		
45	**Parameter-Entnahmetiefe**	*Beispiele:* *einfach (Tiefe angeben) oder topsoil, subsoil or multiple depthes, genetic horizons/layers or fixed depth (definieren)* Bewertung BOKLIM: vorläufig in Abstract beschreiben	-			(X)				Abstract 2.1.5	Representative depth/s sampled		
46	**Parameter-Häufigkeit**	*Beispiele:* *einmalig oder mehrmals unregelmäßg oder mehrmals regelmäßig (Zeitraum/Zeiträume angeben)* Bewertung BOKLIM: vorläufig in Abstract beschreiben	-			(X)				Abstract 2.1.6	Representative date of original data collection		
47	**Parameter-Typ**	*Beispiele:* *numerisch oder integer/float oder text* Bewertung BOKLIM: verzichtbar	-			(X)				Abstract 2.1.4	Type of the variable		
48	**Parameter-Interpretation**	*Beispiele:* *klassifiziert, gemessen, geschätzt (wie GS Soil)* Bewertung BOKLIM: notwendig --> extended attribute	M			(X)				Abstract 2.1.7	Interpretation of the data		
49	**Parameter-Genauigkeit**	*Beispiele:* *gemessen (Messunsicherheit oder Genauigkeit oder RMS oder sonstige (angeben) (wie GS Soil, dort allerdings nicht für jeden Parameter anzugeben - zu prüfen)* Bewertung BOKLIM: kann nicht sinnvoll auf Datensatzebene dokumentiert werden, da probenspezifisch	-			(X)				Abstract 2.2	Accuracy measures/estimates		