

Indikatoren und Berichterstattung zur Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel (DAS)

Hintergrundpapier zum Indikatorenset des Handlungsfelds „Boden“

Stand: 09.11.2023

Versionsverlauf:

27.11.2014	Bosch & Partner GmbH, Konstanze Schönthaler	Version zum Abschluss des DAS-Indikatorenprojekts FKZ 3711 41 106
08.01.2016	Bosch & Partner GmbH, Konstanze Schönthaler	Änderungen im Rahmen des UBA FuE-Vorhabens „Beitrag der Satellitenfernerkundung zur Ermittlung von DAS-Indikatoren“ (FKZ 3714 48 103 0)
02.08.2019	Koordinierungsstelle im UBA I 1.6, Petra van R��th	Aktualisierungen nach der Fortschreibung des DAS-Monitorings 2019
29.05.2022	Bosch & Partner GmbH, Konstanze Schönthaler	Aufnahme zusätzlicher Indikatoren, Überarbeitung bestehender Indikatoren (im Rahmen des UBA FKZ 3720 48 101 0)
08.06.2022	Bosch & Partner GmbH, Konstanze Schönthaler	Einarbeitung von Anmerkungen durch UBA Fachgebiet II 2.7
10.01.2023	Bosch & Partner GmbH, Konstanze Schönthaler	Einarbeitung redaktioneller Anmerkungen aus der IMAA-Abstimmung
08.11.2023	Bosch & Partner GmbH, Konstanze Schönthaler	Finale Redaktion

1	Indikatoren	2
1.1	Versionsverlauf	2
1.2	Änderungen für den Monitoringbericht 2019	2
1.3	Beteiligungen an der Entwicklung der DAS-Monitoring Indikatoren.....	3
2	Thematische Einordnung der Indikatoren, diskutierte Indikationsmöglichkeiten .	5
2.1	Themenfelder.....	5
2.2	Erläuterungen zu Indikationsideen und Indikatoren zum Handlungsfeld „Boden“	8
2.2.1	Impact-Indikatoren	11
2.2.1.1	Bodenwasser	11
2.2.1.2	Bodentemperatur	13
2.2.1.3	Bodenerosion.....	14
2.2.2	Response-Indikatoren	16
2.2.2.1	Anpassung der Landnutzung und des Flächenmanagements	16
2.2.2.2	Vermeidung von Schadverdichtung und Erosion	17
2.2.2.3	übrige Themenfelder	18
2.3	Schnittstellen des Handlungsfelds „Boden“ mit anderen DAS-Handlungsfeldern	18

1 Indikatoren

1.1 Versionsverlauf

Die DAS-Monitoring-Indikatoren wurden im Frühjahr 2014 in einer Ressortabstimmung erstmalig festgelegt. Im Handlungsfeld „Boden“ (BO) wurde im Zuge der ersten Berichtsfortschreibung 2019 ein Response-Indikator aus dem Indikatorenset gestrichen. Die Zeitreihen eines Indikators konnte im Bericht 2019 nicht aktualisiert werden. Für die zweite Fortschreibung 2023 wurden dem Indikatorenset zwei Indikatoren hinzugefügt, ein Fallstudien-Indikator konnte zu einem bundesweiten Indikator weiterentwickelt werden. Die nachstehende Tabelle gibt einen Überblick über den Versionsverlauf.

Tabelle 1: Indikatorenset im Handlungsfeld „Boden“ (Änderungen)

Bericht 2015	Bericht 2019	Bericht 2023	Indikatortitel
Impact-Indikatoren: Auswirkungen des Klimawandels auf die Böden			
BO-I-1	BO-I-1	BO-I-1	Bodenwasservorrat in landwirtschaftlich genutzten Böden
		BO-I-2	Bodenwasser in Waldböden (Fallstudie)
BO-I-2	BO-I-2	BO-I-3	Regenerosivität
		BO-I-4	Temperatur im Oberboden
Response-Indikatoren: Ergriffene Anpassungsmaßnahmen bzw. Maßnahmen oder Entwicklungen, die den Anpassungsprozess im Handlungsfeld „Boden“ unterstützen			
BO-R-1	BO-R-1	BO-R-1	Humusgehalte von Ackerböden (2015, 2019) Humusgehalte von Acker- und Grünlandböden (2023) (Fallstudie)
BO-R-2	BO-R-2	BO-R-2	Dauergrünlandfläche
BO-R-3			Fläche organischer Böden

Über die in Tabelle 1 genannten Indikatoren hinaus sind weitere Indikatoren, die sich direkt oder indirekt mit der Rolle der Böden im Anpassungsprozess beschäftigen, in die Indikatorensets anderer DAS-Handlungsfelder aufgenommen worden (im weiteren Textverlauf werden diese Schnittstellen im Einzelnen benannt). Im DAS-Indikatorenbericht wird auf diese Schnittstellen ebenfalls verwiesen.

1.2 Änderungen für den Monitoringbericht 2019

Im Zuge der ersten Berichtsfortschreibung 2019 wurde der Indikator BO-R-3 (Fläche organischer Böden) aus dem Indikatorenset gestrichen. Organische Böden spielen sowohl in der Klimafolgenanpassung als auch im Klimaschutz eine Schlüsselrolle. Der Indikator BO-R-3 (Fläche organischer Böden) sollte im ersten Monitoringbericht die Fläche naturnaher, von relevanter Nutzung freier organischer (hydromorpher) Böden abbilden. Die Daten wurden für den Nationalen Inventarbericht zum deutschen Treibhausgasinventar (NIR) generiert. Im Zuge der Fortschreibung 2019 ergab die Überprüfung der fachlichen Grundlagen des Indikators, dass Indikator Teil A, der die Fläche organischer Böden mit naturnahem hydrologischem Regime darstellen sollte, auf Grundlage der verwendeten Daten nicht aktualisiert werden kann. Erkenntnisse aus dem Forschungsprojekt "Organische Böden" des Thünen Instituts für Agrarklimaschutz haben gezeigt, dass sich in der Landnutzungskategorie (LUC) „Terrestrische Feuchtgebiete“ nicht nur organische Böden mit naturnahem hydrologischen Regime finden,

sondern auch trockene Standorte. Mit Sicherheit kann über die Böden dieser LUC nur die Aussage getroffen werden, dass diese nicht mehr land- und forstwirtschaftlich sowie für Siedlungszwecke genutzt werden. Aufgrund dieser Erkenntnis konnte Indikator A auf Basis der Ergebnisse der THG-Berichterstattung nicht weitergeführt bzw. fortgeschrieben werden.

Im Zuge der Entwicklung des Indikatorensystems für den ersten Monitoringbericht wurde zudem ein zusätzlicher Indikator zum „Erhaltungszustand geschützter Moorböden“ diskutiert und basierend auf den Daten der FFH-Berichterstattung auch generiert. Dabei wurde die gleiche Methodik zugrunde gelegt, die auch zur Bewertung des Erhaltungszustands der FFH-Lebensräume und -Arten für das Indikatorensystem der Nationalen Strategie zur biologischen Vielfalt zum Einsatz gelangt. Der Indikator fokussierte auf den Erhaltungszustand der FFH-Lebensraumtypen mit einer Vegetation, von der erwartet werden kann, dass sie zumindest auf einem großen Teil ihrer Fläche auf organischen Böden, d. h. torfigen und anmoorigen Substraten stockt. Aufgrund der geringen Flächenabdeckung wurde seine Aussagekraft im Zusammenhang mit dem Themenfeld Anpassung aber vom Bundesamt für Naturschutz (BfN) als nur gering bewertet. Der Indikator wurde daher damals nicht in das DAS-Indikatorenset übernommen.

1.3 Beteiligungen an der Entwicklung der DAS-Monitoring Indikatoren

Da die DAS-Indikatoren primär auf vorhandenen Datenquellen und bereits existierenden bzw. in Diskussion befindlichen Indikatoren aufbauen sollen, war bzw. ist der Austausch mit Fachleuten eine der wesentlichen Voraussetzungen für die Entwicklung fachlich akzeptierter Indikatorensets zu den DAS-Handlungsfeldern. Im Verlauf der Indikatorentwicklung erfolgte die Einbindung einer großen Zahl behördlicher und nicht-behördlicher Expert*innen im Rahmen von bilateralen Gesprächen, Kleingruppensitzungen und Workshops. Die Bearbeitung des Handlungsfelds Boden wurde im ersten FuE-Vorhaben zum Aufbau des DAS-Indikatorensystems von der HNE Eberswalde, Institut für Landschaftsnutzung und Naturschutz im Unterauftrag der Bosch & Partner GmbH bearbeitet. Dabei flossen auch die damaligen Zwischenergebnisse aus dem von der HNE Eberswalde im Auftrag des damaligen Landesamts für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz Brandenburg bearbeiteten Forschungsvorhabens „Brandenburg spezifische Boden-Indikatoren für ein Klimamonitoring im Rahmen der Deutschen Anpassungsstrategie (DAS)“ ein. Im Rahmen dieses Vorhabens wurden 22 Expert*innen aus verschiedenen Bereichen der Wissenschaft, aus Fachbehörden und Vertreter*innen von Praxisdienstleistern zum Ursache-Wirkungskomplex „Klimawandel – Bodeneigenschaften“ befragt. Diese Ergebnisse wurden für die Priorisierung der Themenfelder (s. Tabelle 2) herangezogen. Im weiteren Prozess wurden damals die Indikatoren auf bilateraler Ebene zusammen mit Expert*innen konkretisiert. Zudem befasste sich der Ständige Ausschuss Vorsorgender Bodenschutz (BOVA) der Bund/Länder Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz in seiner Sitzung am 29.1.2013 unter der Leitung der Senatsverwaltung Berlin mit den Indikatorvorschlägen. Aus den Ländern Baden-Württemberg (Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft), Bayern (Staatsministerium für Umwelt und Gesundheit), Brandenburg (Ministerium für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz), Hessen (Hessisches Landesamt Für Umwelt

und Geologie), Sachsen (Sächsischen Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie), Niedersachsen (Landesamtes für Bergbau, Energie und Geologie), Nordrhein-Westfalen (Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz), Thüringen (Ministerium für Landwirtschaft, Forsten, Umwelt und Naturschutz) und Schleswig-Holstein (Ministerium für Energiewende, Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume) sind damals direkte Stellungnahmen zu den einzelnen Indikatoren eingegangen, die in der weiteren Bearbeitung berücksichtigt wurden.

Mit Blick auf die zweite Fortschreibung des Monitoringberichts 2023 war für die Weiterentwicklung der Indikatoren im Handlungsfeld „Boden“ unter anderem das durch das UBA FG II 2.7 beauftragte und durch die ahu GmbH umgesetzte FuE-Vorhaben „Konzeption und Umsetzung eines Klimafolgen-Bodenmonitoring-Verbunds für die Themen Bodenbiologie und organische Bodensubstanz“ (FKZ 3719 71 204 0)¹ maßgeblich. Eines der darin enthaltenen Arbeitspakete widmete sich der Entwicklung eines neuen Indikators zur Bodentemperatur (BO-I-4), der mit maßgeblicher Beteiligung des DWD und konzeptioneller Beratung durch die Bosch & Partner GmbH entstanden ist. Alle weiteren Klärungen zu Indikationsmöglichkeiten und die konkreten Arbeiten zur Überführung der Fallstudie zur Regenerosivität (BO-I-3) in einen bundesweiten Indikator und zur Entwicklung des zusätzlichen Indikators Bodenwasser im Wald (BO-I-2) wurden von Bosch & Partner durchgeführt.

Die nachstehende Tabelle gibt Auskunft über Personen und Institutionen, die auf unterschiedliche Weise und in unterschiedlicher Intensität am Diskussionsprozess um mögliche Indikatoren zum DAS-Handlungsfeld „Boden“ beteiligt waren. Die im Rahmen des o. g. Vorhabens der HNE Eberswalde beteiligten Expert*innen sind in dieser Aufstellung nicht enthalten. Im Prozess der Weiterentwicklung des Indikatorensets für die zweite Berichtsfortschreibung 2023 wurden weitere Expert*innen in die Diskussionen einbezogen.

Tabelle 2: Beteiligte an der Diskussion von Indikatoren im Handlungsfeld „Boden“

Name	Institution
Beteiligungen an der Erstentwicklung bis 2015	
Baritz Dr., Rainer	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Fachbereich 2.2 Informationsgrundlagen Grundwasser und Boden
Beck Dr., Robert	Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, Institut für Agrarökologie, Ökologischen Landbau und Bodenschutz (IAB), Arbeitsgruppe IAB 1 d, Humushaushalt, Umwelt-Mikrobiologie
Böttcher, Falk	Deutscher Wetterdienst (DWD), Agrarmeteorologische Forschungsstelle
Drösler Prof. Dr., Matthias	Hochschule Weihenstephan-Triesdorf, Fakultät Landschaftsarchitektur, Professur für Vegetationsökologie
Gensior Dr., Andreas	Johann Heinrich von Thünen-Institut (TI), Institut für Agrarrelevante Klimaforschung
Hädicke Dr., Andrea	Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (LANUV), Fachbereich 3.2 Bodenschutz, Altlasten, Ökotoxikologie
Löpmeier, Franz-Josef	Deutscher Wetterdienst (DWD), Zentrum für Agrarmeteorologische Forschung (ZAMF)

¹ Kaufmann-Boll C., Kern M., Kastler M., Niederschmidt S., Kappler W., Müller F., Oellers J., Toschki A., Steffens M., Wiesmeier M., Mathews J. 2022: Konzeption und Umsetzung eines Klimafolgen-Bodenmonitoring-Verbunds für Bodenbiologie und organische Bodensubstanz. Teil A: Abschlussbericht zum bodenfachlichen Teil und Teil B: Konzept für den Start des Klimafolgen-Bodenmonitoring-Verbunds. Texte 67/2022, Dessau-Roßlau, 254 S. www.umweltbundesamt.de/publikationen/konzeption-umsetzung-eines-klimafolgen

Name	Institution
Marahrens, Stephan	Umweltbundesamt (UBA), Fachgebiet (FG) II 2.7 Bodenzustand, Bodenmonitoring
Mathews, Jeannette	UBA, FG II 2.7 Bodenzustand, Bodenmonitoring
Neukirchen, Melanie	Bundesamt für Naturschutz (BfN), FG II 1.3 Monitoring
Schultz-Sternberg Prof. Dr., Rüdiger	Hochschule für nachhaltige Entwicklung Eberswalde (HNE), Institut für Landschaftsnutzung und Naturschutz
Suttner Dr., Thomas	Bayerisches Staatsministerium für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz, Referat Bodenschutz und Geologie
Beteiligungen an der Weiterentwicklung bis 2019	
Marx Marc	UBA, FG II 2.7 Bodenzustand, Bodenmonitoring
Beteiligungen an der Weiterentwicklung bis 2023	
Auerswald Prof. i.R. Dr., Karl	Technische Universität München, Lehrstuhl für Grünlandlehre
Böttcher, Falk	DWD, Agrarmeteorologische Forschungsstelle
Kaufmann-Boll, Carolin	ahu GmbH
Kern, Maike	ahu GmbH
Mathews, Jeannette	UBA, FG II 2.7 Bodenzustand, Bodenmonitoring
Ullrich, Antje	UBA, FG II 2.7 Bodenzustand, Bodenmonitoring
Natkhin Dr., Marco	TI, Institut für Waldökosysteme
Wiesmeier Dr., Martin	Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL), Institut für Agrarökologie und Biologischen Landbau, Arbeitsgruppe Humus und Bodenmikrobiologie
Winterrath Dr., Tanja	DWD, Abteilung für Hydrometeorologie

2 Thematische Einordnung der Indikatoren, diskutierte Indikationsmöglichkeiten

2.1 Themenfelder

Im Vorfeld der Diskussion konkreter Indikatoren wurden die thematischen Felder, die bei der Indikatorentwicklung berücksichtigt werden sollten, beschrieben. Sie wurden aus Literaturrecherchen und Expert*inneninterviews abgeleitet. Tabelle 3 gibt einen Überblick über die Themenfelder und die Zuordnung der Indikatoren zu den Themenfeldern bzw. thematischen Teilaspekten. Die im Priorisierungsprozess für die weitere Bearbeitung ausgewählten Themenfelder auf der Impact-Ebene sind grau hinterlegt. Bei der Abgrenzung der Themenfelder und ihrer Priorisierung wurden bei der Erstentwicklung des Indikatorensystems auch die im Positionspapier der BOVA-Redaktionsgruppe „Boden und Klimawandel“² genannten Aussagen zur Betroffenheit der Böden bzw. des Bodenschutzes und zu den Handlungsempfehlungen zur Klimaanpassung berücksichtigt.

² LABO – Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz 2010: LABO-Positionspapier - Klimawandel - Betroffenheit und Handlungsempfehlungen des Bodenschutzes. Stand 09.06.2010, 22 S. www.labo-deutschland.de/documents/LABO_Positionspapier_Boden_und_Klimawandel_090610_aa8_bf5.pdf

Tabelle 3: Themenfelder zum Handlungsfeld „Boden“

Themenfeld	Thematischer Teilaspekt	Indikatoren
Impacts (Auswirkungen des Klimawandels auf den Boden)		
Bodenwasserhaushalt	Änderung des Bodenwasservorrats	BO-I-1: Bodenwasservorrat in landwirtschaftlich genutzten Böden BO-I-2: Bodenwasser im Wald (Fallstudie)
	Abnahme der Infiltrationskapazität	
	Funktionseinschränkung hydromorpher Böden	
Bodenwärmehaushalt	Änderung der Bodentemperatur	BO-I-4: Temperatur im Oberboden
	Änderung der Boden-Strahlungsbilanz	
Bodenstoffhaushalt	Veränderung der Nährstoffrückführung	
	Verminderung der Nährstoffverfügbarkeit	
	Änderung des Säure-/Basenhaushaltes	
	Zunahme leicht löslicher Stoffe im Bodenwasser	
	Erhöhte Schadstoffmobilisierung	
	Änderung der Kohlenstoffdynamik	
Bodenstruktur	Anstieg der Bodenerosion	BO-I-3: Regenerosivität
	Zunahme der Bodenverdichtung	
	Veränderung von Bodengefüge und Humusstruktur	
Bodenbiologie	Veränderung der Funktionalität der Zersetzerkette	
	Veränderung der mikrobiologische Aktivität	
	Änderung der Zusammensetzung von Bodenorganismen	
Responses (Ergriffene Anpassungsmaßnahmen bzw. Maßnahmen oder Entwicklungen, die den Anpassungsprozess unterstützen)		
Aufklärung über Risiken und Gefährdungen	Aufklärung der Öffentlichkeit	
	Entwicklung bzw. Ausbau des Risikomanagements	
	Aufklärung der Bodennutzer	
	Entwicklung bzw. Ausbau von Frühwarnsystemen und Informationsdiensten	
Anpassung der Raum- und Nutzungsstruktur	Optimierung der Infrastruktur zur Sicherung der Lebensraumfunktion	Schnittstelle zum DAS-Querschnittsthema „Raum-, Regional- und Bauleitplanung“: RO-R-5 (Anstieg der Siedlungs- und Verkehrsfläche)
	Optimierung der Infrastruktur zum Erosionsschutz	
	Erhaltung und Schaffung von Retentionsräumen, (Gebiets-)wasserrückhalt	Schnittstelle zum DAS-Querschnittsthema „Raum-, Regional- und Bauleitplanung“:

Themenfeld	Thematischer Teilaspekt	Indikatoren
		RO-R-2 (Vorrang- und Vorbehaltsgebiete für Grundwasserschutz / Trinkwassergewinnung) RO-R-3 (Vorrang- und Vorbehaltsgebiete für (vorbeugenden) Hochwasserschutz) RO-R-6 (Siedlungsnutzung in amtlich festgesetzten Überschwemmungsgebieten)
	Ausweisung von Schutz- und Vorranggebieten	Schnittstelle zum DAS-Querschnittsthema „Raum-, Regional- und Bauleitplanung“: RO-R-1 (Vorrang- und Vorbehaltsgebiete für Natur und Landschaft) RO-R-2 (Vorrang- und Vorbehaltsgebiete für Grundwasserschutz / Trinkwassergewinnung) RO-R-3 (Vorrang- und Vorbehaltsgebiete für (vorbeugenden) Hochwasserschutz)
Anpassung der Landnutzung, des Flächenmanagements	Anpassung der Bewirtschaftungsplanung an die Änderung der Standorteigenschaften	BO-R-2: Dauergrünlandfläche Schnittstelle zum DAS-Handlungsfeld „Wald und Forstwirtschaft“: FW-R-1 – ruhend (Mischbestände) FW-R-1 (Förderung des Waldumbaus) FW-R-3 – ruhend (Umbau gefährdeter Fichtenbestände)
	Anpassung des Bewirtschaftungsmanagements an die Änderung der Standorteigenschaften	Schnittstelle zum DAS-Handlungsfeld „Landwirtschaft“: LW-R-6 (Landwirtschaftliche Bewässerung)
	Managementmaßnahmen zur Verminderung der Vulnerabilität	BO-R-1: Humusgehalte von Acker- und Grünlandböden (Fallstudie) Schnittstelle zum Handlungsfeld „Wald und Forstwirtschaft“: FW-R-3 (Humusvorrat in Waldböden)
Anpassung / Erweiterung des Bodenmonitorings	Programme zur Bodenerfassung / -kartierung	
	Bodenmessprogramme	
Erweiterung der bodenbezogenen Forschung	Weiterentwicklung von Haushalts- und Bilanzmodellen	
	Weiterentwicklung von Planungs- und Vorsorgeinstrumenten	

Diese Priorisierung wurden im Wesentlichen durch die Ergebnisse der bundesweiten Klimawirkungs- und Risikoanalyse 2021 (KWRA³) bestätigt. Auch darin werden die größten Herausforderungen bis zur Mitte und zum Ende des Jahrhunderts bei den Klimawirkungen „Wassermangel im Boden“ und „Sickerwasser“ gesehen. Zudem wurde die Problematik der Bodenerosion (durch Wasser und Wind) als hoch relevant eingestuft. Dieser thematische Teilaspekt

³ Kahlenborn W., Porst L., Voß M., Fritsch U., Renner K., Zebisch M., Wolf M., Schönthaler K., Schauser I. 2021: Klimawirkungs- und Risikoanalyse 2021 für Deutschland. Kurzfassung. Climate Change 26/2021. Dessau-Roßlau, 127 S. www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/5750/publikationen/2021-06-10_cc_26-2021_kwra2021_kurzfassung.pdf

im Themenfeld „Bodenstruktur“ war für den DAS-Monitoringbericht 2015 zwar nicht priorisiert worden, dennoch wurde eine Fallstudie zur Bodenerosion durch Wasser bereits im ersten Monitoringbericht platziert. Im Zug der zweiten Fortschreibung des Monitoringberichts 2023 erging der Expertenhinweis, dass der thematische Teilaspekt „Bodenerosion“ im Themenfeld „Bodenstruktur“ nicht gut platziert ist. Eine strukturelle Einordnung ist generell schwierig, da die Erosion auf viele Bodenprozesse Einfluss nimmt, auch die Bodenfruchtbarkeit stark beeinflusst und gleichzeitig zu Offsite-Schäden führt. Eine grundlegende Diskussion des Themenfeld-Zuschnitts konnte im Rahmen der zweiten Fortschreibung des Monitoringberichts 2023 nicht geführt werden. Sie ist aber möglicherweise Gegenstand weiterer Diskussionen im Zuge der Fortschreibung der DAS.

2.2 Erläuterungen zu Indikationsideen und Indikatoren zum Handlungsfeld „Boden“

Im Handlungsfeld „Boden“ konnte mit der zweiten Fortschreibung des Monitoringberichts eine Erweiterung des Indikatorensets vorgenommen werden. Nach wie vor stellt die bundesweite Auswertung von Bodendaten aber eine Herausforderung dar. Grundsätzlich kommen als Datenquelle für die bundesweiten DAS-Indikatoren die im Folgenden genannten Mess- und Beobachtungsprogramme in Betracht:

Die Erhebungen auf den Boden-Dauerbeobachtungsflächen (BDF) werden als eine zentrale Datenquelle für bodenbezogene Indikatoren für das DAS-Indikatorensystem gesehen, da für dieses Programm Wiederholungserhebungen als annähernd gesichert gelten und außerdem mit einer vergleichsweise hohen Dichte an Messstellen gearbeitet wird. Schwierigkeiten mit der länderübergreifenden Auswertung resultieren daraus, dass es trotz der bundesweiten Harmonisierungsbemühungen noch mehr oder weniger große Unterschiede in der Umsetzung (insbesondere in den Methoden der Probenahme und Analytik) durch die Länder gibt. Bemühungen zur bundesweiten Auswertung der BDF-Daten gibt es seitens des UBA zwar seit mehreren Jahren⁴, aufgrund der unterschiedlichen Startzeitpunkte und des hohen Aufwands für die Analytik, Qualitätssicherung sowie die Datenbereitstellung stehen bisher aber länderübergreifend nicht in ausreichendem Umfang Daten zur Verfügung, um darauf basierend bundesweite Indikatoren zu entwickeln. Hinzu kommt, dass die Erhebungen auf den BDF in erster Linie auf die stoffliche Belastung abzielen, erst im Laufe der Jahre gewannen Aspekte des Klimawandels an Bedeutung.

⁴ Spatz P. 2001: Möglichkeiten der länderübergreifenden Auswertung an Standorten der Bodendauerbeobachtung – ausgehend von der Zusammenstellung der Metadaten aus den Ländern. Texte 22/01, 135 S.

Huscek G., Krengel D., Kayser M., Bauriegel A., Burger H. 2004: Länderübergreifende Auswertung von Daten der Boden-Dauerbeobachtung der Länder. Texte 50/04, Berlin, 104 S.

Schilli C., Rinklebe J., Lischeid G., Kaufmann-Boll C., Lazar S. 2011: Auswertung der Veränderungen des Bodenzustands für Boden-Dauerbeobachtungsflächen (BDF) und Validierung räumlicher Trends unter Einbeziehung anderer Messnetze - Teil B: Datenauswertung und Weiterentwicklung des Monitorings. Texte 90/2011, 131 S.

Als zusätzliche Datenquellen sind außerdem die Erhebungen im Rahmen der Bodenzustandserhebung (BZE) geeignet. Für die BZE im Wald liegen inzwischen die Ergebnisse der bundesweiten Wiederholungserhebung vor. Für das DAS-Handlungsfeld „Wald und Forstwirtschaft“ lässt sich basierend auf diesen Daten der DAS-Indikator zum organischen Kohlenstoff (s. FW-R-5: Humusvorrat in forstlichen Böden) fortschreiben. Die Bodenzustandserhebung Landwirtschaft (BZE-LW) startete als erste bundesweit einheitliche Inventur landwirtschaftlich genutzter Böden im Auftrag des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) im Jahr 2011. Zwischen 2011 und 2018 wurden deutschlandweit in einem 8 x 8 km Raster die Vorräte an organischem Kohlenstoff in landwirtschaftlichen Böden bis in eine Tiefe von einem Meter erfasst und ihre Beeinflussung durch Standort- und Nutzungsfaktoren bewertet⁵. Die BZE-LW basiert auf der freiwilligen Zusammenarbeit mit über 3.000 Landwirt*innen. Sie dient in erster Linie der wissenschaftlichen Absicherung und Weiterentwicklung der Treibhausgas-Emissionsberichterstattung Deutschlands im Rahmen der UNFCCC und des Kyoto-Protokolls. Perspektivisch sind diese Daten nach einer Wiederholungserhebung auch für das DAS-Monitoring von Interesse. Der Vorteil der BZE-LW liegt in einer repräsentativen Erfassung der Vorräte an organischem Bodenkohlenstoff auf Bundesebene. Die Messgrößen fokussieren auf den Kohlenstoffvorräten in den Böden sowie auf beeinflussende Parameter dieser Zielgröße. Es werden daher neben den Kohlenstoffvorräten umfassende Bodenparameter erhoben und auch Parameter zur landwirtschaftlichen Bewirtschaftung erfasst. Für eine Konsistenz mit bestehenden Berichtspflichten ist zukünftig die Verwendung der BZE-LW für das DAS Monitoring wünschenswert. Die Wiederholungsbeprobung wird 2023–2027 durchgeführt werden.

Das agrarmeteorologische Messnetz liefert in den Bundesländern Daten zum Bodenwasser- und Bodentemperaturhaushalt. Basierend auf diesen Daten ist bereits für den ersten Monitoringbericht 2015 der Indikator BO-I-1 (Bodenwasservorrat in landwirtschaftlich genutzten Böden) entstanden. Die Daten des Messnetzes wurden im Zuge der zweiten Fortschreibung des Monitoringberichts 2023 außerdem genutzt, um einen Indikator zur Temperatur im Oberboden zu generieren.

In den bodenkundlichen Fachinformationssystemen der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) sowie der Staatlichen Geologischen Dienste (SGD) der Bundesländer werden Profil- und Messdaten vorgehalten, die Standard-konform erfasste Datensätze enthalten und daher in hohem Maß harmonisiert vorliegen (Profilbeschreibungen gemäß Bodenkundlicher Kartieranleitung, DIN-Analyseverfahren). Diese Daten sind die Voraussetzung, um Flächenbezüge für bodenrelevante Daten herzustellen. Für die Übertragung von Daten in die Fläche haben BGR und SGD einen Katalog von Auswertungsmethoden entwickelt und national abgestimmt (Pedotransferfunktionen, zum Beispiel zum Wasserhaushalt, s. Ad Hoc-AG Boden

⁵ Jacobs A., Flessa H., Don A., Heidkamp A., Prietz R., Dechow R., Gensior A., Poeplau C., Riggers C., Schneider F., Tiemeyer B., Vos C., Wittnebel M., Müller T., Säurich A., Fahrion-Nitschke A., Gebbert S., Jaconi A., Kolata H., Laggner A. et al 2018: Landwirtschaftlich genutzte Böden in Deutschland - Ergebnisse der Bodenzustandserhebung. Braunschweig: Johann Heinrich von Thünen-Institut, 316 S., Thünen Rep 64.
doi: 10.3220/REP1542818391000

2000⁶). Qualitätsgesicherte Flächendaten auf Bundesebene wie auch Methoden stehen kostenfrei zur Verfügung. Eine direkte Nutzung dieser Daten- und Informationsquelle für das DAS-Monitoring hat bisher nicht stattgefunden.

Aussagen, auf wie vielen Flächen innerhalb Deutschlands klimabedingte Bodengefährdungen vorliegen, und Antworten auf die Frage, inwieweit Änderungen des Nutzungsregimes zu einer Verbesserung oder Verschlechterung der Situation beitragen, sind auf eine flächenscharfe Verschneidung von Bodendaten mit Nutzungsdaten angewiesen. Letztendlich entscheidet die spezifische Kombination von Nutzungsform und -ausprägung und lokalen Bodeneigenschaften darüber, ob eine Nutzung nachhaltig ist oder zu Bodenbelastungen führt. Eine solche Verschneidung setzt jedoch ausreichend hoch aufgelöste und kontinuierlich aktualisierte Flächeninformationen voraus. Während hochauflösende Bodenkartierdaten seitens BGR und SGD bereitgestellt werden, ist die Situation mit Blick auf die Verfügbarkeit räumlich hochaufgelöster Nutzungsdaten problematischer.

Das UBA hat vor dem Hintergrund der problematischen Datenlagen in den letzten Jahren mehrere Forschungsprojekte in Auftrag gegeben, in denen die Situation und Verfügbarkeit bei den bodenbezogenen Daten im Hinblick auf die bundesweite Darstellung und Beschreibung des Bodenzustands und seiner Veränderungen umfassend analysiert und beschrieben worden ist. Der Fokus lag dabei vor allem auf dem Themenfeld Klimaanpassung und Klimaschutz. Im Ergebnis liegt seit 2022 ein Konzept für einen Klimafolgen-Bodenmonitoring-Verbund vor⁷. Auf die Arbeiten wird im weiteren Text näher eingegangen. Ein weiteres UBA-Vorhaben „Ausbau und Weiterentwicklung bodenbezogener Indikatoren für die nationale und EU-weite Berichterstattung zur Klimaanpassung und zum Klimaschutz“ soll sich ab Mitte 2022 der Frage widmen, wie die Bundesregierung bei der nationalen und EU-weiten Berichterstattung zu Fragen der Klimaanpassung und des Klimaschutzes mit Indikatoren aus bundesweiten harmonisierten qualitätsgesicherten Bodeninformationen unterstützt werden kann. Es sollen Vorschläge für weitere Indikatoren entwickelt werden.

Nach Veröffentlichung des ersten indikatorengestützten „Monitoringberichts 2015 zur Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel“ wurden im Rahmen des UBA FuE-Vorhabens „Beitrag der Satellitenfernerkundung zur Ermittlung von DAS-Indikatoren“ (FKZ 3714 48 103 0⁸) die Möglichkeiten einer Nutzung von Fernerkundungsdaten, speziell von Satellitenda-

⁶ Ad Hoc-AG Boden 2000: Methodendokumentation Bodenkunde. Auswertungsmethoden zur Beurteilung der Empfindlichkeit und Belastbarkeit von Böden. Sonderhefte Reihe G - Geol. Jahrb., Heft 1, 232 S.
www.bgr.bund.de/DE/Themen/Boden/Netzwerke/AGBoden/auswertungsmethoden.html;jsessionid=408908B076E879C216DAA5D0FED4E2D1.internet971?nn=1542204

⁷ Kaufmann-Boll C., Niederschmidt S., Bammingen C., Kastler M., Müller F., Wurbs D., Steininger M. 2020: Konzeption und Umsetzung eines Klimafolgen-Bodenmonitoring-Verbunds. Texte 41/2020, Dessau-Roßlau, 125 S.
www.umweltbundesamt.de/publikationen/klimafolgen-bodenmonitoring-verbund

⁸ Schönthaler K., von Andrian-Werburg S., Zebisch M., Becker D. 2017: Welchen Beitrag können Satellitenfernerkundung und insbesondere Copernicus-Daten und -Dienste für die Ermittlung ausgewählter Indikatoren des Indikatoren-Sets der Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel (DAS) leisten. Climate Change 7/2017, Dessau-Roßlau, 157 S.
www.umweltbundesamt.de/publikationen/welchen-beitrag-können-satellitenfernerkundung

ten zur Weiterentwicklung bestehender DAS-Indikatoren und zur Entwicklung zusätzlicher Indikatoren geprüft. Die Ergebnisse dieser Prüfung sind in die folgenden Darstellungen eingeflossen.

2.2.1 Impact-Indikatoren

Der Priorisierung in Tabelle 3 folgend lag der Fokus der Indikatorenentwicklung für die Impact-Ebene auf den beiden Größen Bodentemperatur und Bodenfeuchte. Veränderungen dieser Parameter sind erste Spiegel der direkten Auswirkungen veränderter Klimaverhältnisse. Der Bodenwärme- und Wasserhaushalt der Böden steht vor allem aber auch in unmittelbarem Zusammenhang mit einer Vielzahl von Bodenfunktionen und ist damit Dreh- und Angelpunkt für alle weiteren klimawandelbezogenen Wirkungen. Rückschlüsse sind unter anderem möglich auf die Freisetzung von Nähr- und Schadstoffen, die Freisetzung von Klimagasen und Veränderungen der Bodenlebensgemeinschaften sowie auf die Gefährdungen der Böden durch Bodenerosion und Verdichtung möglich⁹. Von Indikatoren zur unmittelbaren Darstellung von Veränderungen des Stoffaushalts im Boden wurde abgesehen, da es hier noch zu viele Unsicherheiten bezüglich der Zusammenhänge mit Klimafolgen gibt (dies gilt sowohl für die Nährstoffe als auch mit Blick auf das veränderte Mobilisierungsverhalten von Schadstoffen).

2.2.1.1 Bodenwasser

Daten zum Bodenwasserhaushalt (Bodenwassergehalt bzw. Bodenfeuchte, s. Indikator BO-I-1) werden derzeit in mehreren Programmen erhoben. Zu erwähnen sind insbesondere die Intensiv- und Basis-BDF, die Level II-Flächen im Wald, die Landwirtschaftlichen Dauerfeldversuche und die Feldlysimeter-Dauerversuche sowie das ICOS-D und ICP-Integrated Monitoring, die vergleichsweise hochfrequente Erhebungen durchführen. Die Messstellen sind aber in unterschiedlicher Dichte über Deutschland verteilt und repräsentieren die Bodenverhältnisse unterschiedlich gut¹⁰.

Relevant sind außerdem die vom DWD bundesweit in seinem agrarmeteorologischen Messnetz erhobenen Daten. Trotz der vergleichsweise hohen Datendichte in Deutschland ist die Situation allerdings für die konkrete Berechnung von Indikatoren problematisch, da anwendungsreife repräsentative Auswertungen bzw. Auswertungsmethoden für Flächendaten nicht oder nur eingeschränkt zur Verfügung stehen. Eine Kopplung dieser flächenbezogenen Verfahren mit Daten aus Messnetzen ist derzeit aufgrund fehlender Datenschnittstellen und Datenverfügbarkeit noch nicht möglich. Eine Vernetzung der verschiedenen Messprogramme würde eine Vereinheitlichung der heterogenen Datenpools erfordern, würde allerdings durch Synergieeffekte wissenschaftliche und wirtschaftliche Vorteile bringen¹¹. Für einen Indikator

⁹ Kaufmann-Boll C., Kappler W., Lazar S., Meiners G., Tischler B., Baritz R., Düwel O., Hoffmann R., Utermann J., Makeschin F., Abiy M., Rinklebe J., Prüß A., Schilli C., Beylich A., Graefe U. 2011: Anwendung von Bodendaten in der Klimaforschung. Texte 65/2011, Dessau-Roßlau, 376 S.
www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/461/publikationen/4187.pdf

¹⁰ s. Fußnote 7

¹¹ s. Fußnote 9

zum Bodenwasserhaushalt landwirtschaftlich genutzter Flächen wurde daher bei der Erstentwicklung der DAS-Monitoringindikatoren entschieden, auf die Daten des agrarmeteorologischen Messnetzes des DWD zurückzugreifen, da dort routinemäßige Erhebungen und hochfrequente Auswertungen bzw. Berechnungen des Bodenwassergehalts für die Aktualisierung des Deutschen Klimaatlas erfolgen.

Perspektivisch für die Weiterentwicklung dieses Indikators sind die Ergebnisse und Empfehlungen aus dem bereits erwähnten UBA-Projekt zum Bodenmonitoring-Verbund von Bedeutung. Im Rahmen dieses Forschungsprojekts wurde ein Konzept für künftige bundesweite Aussagen zum Bodenwasserhaushalt erarbeitet, das auf einer fachlich sinnvollen Vernetzung der verschiedenen Erhebungsprogramme basiert. Der Bodenmonitoring-Verbund versteht sich als ein Netzwerk der datenerhebenden Stellen, in dem qualitätsgesicherte harmonisierte Bodeninformationen über den Bodenzustand und seine Veränderungen zugänglich sind. Für die Teilnahme am Bodenmonitoring-Verbund haben die datenerhebenden Stellen 122 Standorte mit Messeinrichtungen für den Bodenwasserhaushalt gemeldet, die auf prinzipiell vergleichbaren Untersuchungskonzepten und Messtechniken beruhen. Einschränkungen der Vergleichbarkeit ergeben sich aus der Standortcharakteristik mit der jeweiligen forstlichen oder landwirtschaftlichen Nutzung und der realen (nicht konstanten) Bewirtschaftung, teilweise aber auch aus unterschiedlichen Messtiefen.

Die für die Auswertungen genutzten Modelle sind qualitätsgesichert und die Aussagen sind bundesweit repräsentativ. Von Beginn an wurde eine weitere Qualifizierung dieses Indikators gewünscht, da es sich um modellierte Daten handelt und der Indikator selbst nicht einfach zu verstehen ist. Im Rahmen des oben erwähnten FuE-Vorhabens „Beitrag der Satellitenfernerkundung zur Ermittlung von DAS-Indikatoren“ wurde geprüft, inwieweit eine Weiterentwicklung des Indikators mithilfe von Fernerkundungsdaten möglich ist. Als mögliche Datenquellen wurde insbesondere der Soil Water Index der globalen Komponente des Copernicus-Dienstes zur Landüberwachung identifiziert. Die Radar-gestützten Erfassungen beziehen sich allerdings nur auf die oberen 5 cm des Bodens und liegen auch nur in einer relativ groben räumlichen Auflösung vor. Aussagen zu tieferen Bodenschichten im Soil Water Index basieren auf Modellierungen. Für Hinweise auf (z. B. jahreszeitliche) Anomalien wären diese Daten aber geeignet. Der Soil Water Index wäre grundsätzlich auch mit Blick auf Funktionseinschränkungen hydromorpher Böden von Interesse. Insbesondere hierfür bedürfte es allerdings Daten mit einer höheren räumlichen Auflösung.

Für die zweite Berichtsfortschreibung 2023 wurden ergänzend zu den modellierten Daten zu den landwirtschaftlich genutzten Flächen die Datenquelle der LEVEL II-Messstellen für Auswertungen zu Waldböden erschlossen. Die Länderdaten aus dem LEVEL II-Messnetz werden vom Thünen-Institut Waldökosysteme zusammengetragen. Es wurde über alle dem TI Waldökosysteme zur Verfügung stehenden Daten der LEVEL II-Messstellen hinweg geprüft, welche Stationen über möglichst viele Jahre hinweg Daten liefern. Die bayerischen Stationen erfüllen die Bedingungen am besten und wurden daher für die Fallstudie herangezogen (BO-I-2: Bodenwasser im Wald. Mit Hilfe von Wasserhaushaltsmodellen sollen die Wassergehalte

an allen LEVEL II-Messstellen modelliert werden und so homogene lückenlose Zeitreihen erstellt werden. Damit wird perspektivisch die Datengrundlage verbessert, und es werden über Bayern hinaus Auswertungen möglich sein.

Vom DWD wird inzwischen der sogenannte „Bodenfeuchteviewer“ angeboten, der die Bodenfeuchte und anderer Wasserhaushaltsgrößen interaktiv darstellt und damit erlaubt, das Wasserangebot im Boden zu überwachen. Die flächendeckenden Informationen zum Bodenfeuchtezustand wurden mit dem Modell AMBAV 2.0 berechnet, das insbesondere für die Bereiche Land-, Forstwirtschaft und Gartenbau geprüft und validiert wurde. Die Bodenfeuchte wird für unterschiedliche Tiefen (bis 200 cm) und unter verschiedenen Kulturen ein Jahr rückwirkend dargestellt. Außerdem lässt sich für jede Position auf der Karte ein Bodenfeuchteprofil erzeugen. Der Bodenfeuchteviewer ist als Beratungs- und Unterstützungsinstrument für die Land- und Forstwirtschaft und den Gartenbau gedacht. Da es sich wie beim „Bodenfeuchteviewer“ ebenfalls um modellierte Daten handelt, wurde im Zuge der Diskussionen um die zweite Fortschreibung des Monitoringberichts 2023 entschieden, diese Datenquellen nicht für einen zusätzlichen Indikator zu nutzen, da gegenüber dem bereits im Indikatorenset enthaltenen Indikator BO-I-1 kein relevanter Zusatznutzen zu erwarten ist, der den Aufwand der Datenverarbeitung rechtfertigenden würde.

Im Zusammenhang mit der Thematik Bodenwasserhaushalt sei auch auf die Schnittstelle zum DAS-Handlungsfeld „Wasserhaushalt und Wasserwirtschaft“ (WW) verwiesen, in dem u. a. der Indikator „Grundwasserstand und Quellschüttung“ (WW-I-1) geführt wird. Sinkende Grundwasserspiegel haben insbesondere für Böden mit Grundwasserkontakt direkte Auswirkungen auf den Bodenwasserhaushalt. Sinkt das Grundwasser ab, kann dies zu fehlendem Wasserinput über den offenen und geschlossenen Kapillarsaum führen. Steigende Grundwasserstände hingegen können Bereichen des Bodens über den kapillaren Aufstieg Wasser zuführen, die derzeit nur durch Niederschlag und / oder lateralen Zufluss Einträge von Wasser erhalten. Mit diesen Veränderungen sind in der Regel auch stoffliche Veränderungen im Boden verbunden¹².

2.2.1.2 Bodentemperatur

In den Monitoringberichts 2023 kann nun ein Indikator zur „Temperatur im Oberboden“ (BO-I-4) eingebunden werden. Er wurde vom UBA (FG II 2.7) gemeinsam mit dem DWD, Abteilung Agrarmeteorologie und der ahu GmbH (Forschungsnehmer) im Rahmen des bereits erwähnten Vorhabens zum Bodenmonitoring-Verbund konzipiert. Die Daten stammen aus dem agrarmeteorologischen Messnetz. Die Entwicklung der Bodentemperatur kann nur exemplarisch anhand ausgewählter Messstellen für das gesamte Bundegebiet abgebildet werden, da sie in der Vergangenheit nicht an allen Wetterstationen des DWD gemessen und auch nicht für alle Stationen digital aufbereitet wurde. Vor diesem Hintergrund wurden Daten von 15 Stationen, die repräsentativ über Deutschland verteilt sind, verarbeitet.

¹² s. Fußnote 9: 117

Die mögliche Nutzung von Satellitendaten zur Erfassung der Bodentemperatur wurde auch im FuE-Vorhaben „Beitrag der Satellitenfernerkundung zur Ermittlung von DAS-Indikatoren“ geprüft. Dabei wurde insbesondere die Land Surface Temperature als Produkt der globalen Komponente des Copernicus-Dienstes zur Landüberwachung in den Blick genommen. Diese bildet allerdings die Oberflächentemperatur des Gesamtsystems Vegetation und Boden ab. Eine spezifische Betrachtung der Bodentemperaturentwicklung wäre höchstens in den vegetationsärmeren Jahreszeiten des Frühlings und Herbstes möglich. Alternativ besteht die Möglichkeit, auf die laufenden Arbeiten im Rahmen von EUMETSAT CM SAF (The EUMETSAT Satellite Application Facility on Climate Monitoring) zuzugreifen. Seit Ende 2016 soll ein Datensatz zur Landoberflächentemperatur CDR verfügbar sein. Grundsätzlich bietet CM SAF alle Daten zur Bestimmung der Boden-Strahlungsbilanz.

2.2.1.3 Bodenerosion

Auch die Bodenerosion gehört zu den intensiv im Zusammenhang mit Klimaveränderungen diskutierten Wirkungsbereichen. Als Ursachen verstärkter Wassererosion werden unter anderem vermehrte erosive Starkregenereignisse und eine Zunahme der Winterniederschläge betrachtet. Für die Winderosionsgefährdung gilt Ähnliches; hier wird bei Zunahme von Windgeschwindigkeiten und Trockenperioden ebenfalls von einem verstärkten Erosionsgeschehen ausgegangen¹³.

Ein flächendeckendes repräsentatives Erosions-Monitoring gibt es in Deutschland bislang nicht. Es gibt hier noch zahlreiche ungelöste Fragen, die methodischen Herangehensweise an ein solches Erosions-Monitoring betreffend sowie die Lösung des Problems der extremen raum-zeitlichen Variabilität, die vor allem durch die raum-zeitlichen Variabilität der Regenerosivität verursacht wird. Einen umfassenden Überblick über die aktuelle Datenlage bietet der Abschlussbericht zum Bodenmonitoring-Verbunds, in dem die bodenbezogenen Mess- und Erhebungsaktivitäten mit Blick auf die Bodenerosion umfassend analysiert und dokumentiert wurden. Die Autor*innen des Berichts kamen darin zum Schluss, dass momentan keine bundesweiten Aussagen getroffen werden können. In nur zwei Bundesländern ist ein Messnetz zur langfristigen Erfassung der Bodenerosion vorhanden. Es wird auf bestehenden BDF und Erosionsmessflächen durchgeführt (Baden-Württemberg, Niedersachsen). Einen anderen methodischen Ansatz verfolgt Sachsen-Anhalt auf zwei BDF über ein Feinnivellement. Zum jetzigen Zeitpunkt ist ein Horizontalvergleich der Erosion innerhalb Deutschlands für die Bewertung der Klimavulnerabilität nicht möglich.

Im Rahmen der Weiterentwicklung der Fallstudie zur Bodenerosion wurde auch diskutiert, auf schadensfallabhängige Kartierungen in den Bundesländern (Erosionskatastern) zurückzugreifen. Erosionskataster werden aber nur in wenigen Bundesländer geführt, auch nicht überall konsequent und vor allem nicht nach einheitlichen Kriterien, so dass eine bundesweite Übersicht geschaffen werden kann.

¹³ s. Fußnote 2

Im Aktionsplan Anpassung wird aus diesem Grunde explizit auf die Notwendigkeit hingewiesen, ein systematisches, vergleichbares und deutschlandweites Erosions-Monitoringsystem im Zusammenhang mit einer webbasierten Informationsplattform für Bodendaten aufzubauen und zu etablieren. Ggf. könnten Satellitendaten einen Beitrag zu einem solchen Erosions-Monitoring liefern (z. B. über eine „change detection“ veränderter Strukturen). Unmittelbare praktikable Ansätze gibt es hierzu allerdings bisher nicht.

Mit Blick auf die Einflüsse des Klimawandels nehmen direkt die Regenerosivität und indirekt die sich verändernde Bodennutzung Einfluss auf das Erosionsrisiko und Erosionsgeschehen. Die Regenerosivität (R-Faktor der Bodenabtragsgleichung) beschreibt die gebietspezifische erosionsauslösende Wirkung des Niederschlags, insbesondere die der erosiv wirkenden Starkniederschläge. Der R-Faktor lässt sich aus hochfrequenten Niederschlagsmessungen ermitteln. Der Anstieg des R-Faktors beträgt gegenwärtig etwa 10 % in sechs Jahren¹⁴.

Um das wichtige Thema im Monitoringbericht verankern zu können, wurde für den ersten Monitoringbericht 2015 ein Fallstudien-Indikator für Nordrhein-Westfalen etabliert. Im Rahmen eines Forschungsvorhabens¹⁵ wurde hier eine Zeitreihe aufgebaut und eine Methodik etabliert, die eine künftige Fortschreibung ermöglicht. Im Monitoringbericht 2019 wurde der Indikator erneut präsentiert, allerdings konnte die Zeitreihe nicht mit aktuellen Daten fortgeschrieben werden. Für den Monitoringbericht 2023 konnte die bisherige Fallstudie durch einen bundesweiten Indikator ersetzt werden. Er basiert nun auf den RADKLIM-Daten (Radar-gestützte, hochaufgelöste Niederschlagsklimatologie) und lässt sich auch in Zukunft problemlos fort-schreiben (BO-I-3 Regenerosivität). Die Ausarbeitung erfolgte in enger Abstimmung mit dem DWD / Abteilung Hydrometeorologie (Dr. Tanja Winterrath), der Technischen Universität München sowie der Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL), Institut für Agrarökologie und Biologischen Landbau (Prof. i. R. Dr. Karl Auerswald). Da die Wahrscheinlichkeit und Stärke von Starkregenereignissen innerhalb Deutschlands unterschiedlich hoch ist (so sind an der Küste und im norddeutschen Flachland die Starkregenereignisse meist seltener als in der Mitte und im Süden, wo das Gelände orographisch stärker gegliedert ist und konvektive Prozesse in der Atmosphäre begünstigt werden) wird die Zeitreihendarstellung durch eine Karte zur Regionalisierung ergänzt. Eine methodische Weiterentwicklung des Indikators ist denkbar. Dies betrifft zum einen die Berücksichtigung von (unter anderem klimawandelbedingten) Änderungen in den Fruchtfolgen und der Bodenbedeckung. Der Einfluss der Fruchtfolgen (C-Faktor der Allgemeinen Bodenabtragsgleichung) könnte mit den zeitlichen Veränderungen aus agrarstatistischen Daten abgeleitet werden¹⁶. Zum anderen ist eine zeitliche Differenzierung der Regenerosivität über das Jahr hinweg von Interesse, da dies vor allem Einfluss auf die

¹⁴ Auerswald K., Fischer F., Winterrath T., Elhaus D., Maier H., Brandhuber R. 2019: Klimabedingte Veränderung der Regenerosivität seit 1960 und Konsequenzen für Bodenabtragsschätzungen. In Bachmann G., König W., Uter-mann J. (Hg.): Bodenschutz, Ergänzbare Handbuch der Maßnahmen und Empfehlungen für Schutz, Pflege und Sanierung von Böden, Landschaft und Grundwasser (Loseblattsammlung). Berlin, 4090, 21. S.

¹⁵ Neuhaus P., Fiener P., Botschek J. 2010: Einfluss des globalen Klimawandels auf die räumliche und zeitliche Variabilität der Niederschlagserosivität in NRW. Abschlussbericht, 2. August 2010, i.A. des Landesamts für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nord rhein-Westfalen, 89 S.

¹⁶ Auerswald K., Ebertseder F., Levin K., Yuan Y., Prasuhn V., Plambeck N.O., Menzel A., Kainz M. 2021: Sum-mable C factors for contemporary soil use. Soil and Tillage Research 213, 105155, 12 S.
doi: 10.1016/j.still.2021.105155

Offsite-Schäden hat. Es liegen auch hier Daten vor, um die Eigenschaften erosiver Regen zu quantifizieren.

2.2.2 Response-Indikatoren

2.2.2.1 Anpassung der Landnutzung und des Flächenmanagements

Auf der Response-Ebene wurden im Zuge der Erstellung des ersten Monitoringberichts 2015 Indikationsmöglichkeiten zu allen Themenfeldern geprüft. Für das Themenfeld „Anpassung der Raum- und Nutzungsstruktur“, mit dem großräumigere Nutzungsstrukturen angesprochen sind, gibt es mehrere Schnittstellen mit dem DAS-Querschnittsthema „Raum-, Regional- und Bauleitplanung“ (RO), in dem der Steuerung der Flächennutzung zur Anpassung an Klimafolgen eine zentrale Bedeutung zukommt. Indikatoren wie RO-R-5 (Anstieg der Siedlungs- und Verkehrsfläche), RO-R-6 (Siedlungsnutzung in amtlich festgesetzten Überschwemmungsgebieten), RO-R-1 (Vorrang- und Vorbehaltsgebiete für Natur und Landschaft), RO-R-4 (Vorrang- und Vorbehaltsgebiete für Grundwasserschutz / Trinkwassergewinnung) und RO-R-3 (Vorrang- und Vorbehaltsgebiete für (vorbeugenden) Hochwasserschutz) fokussieren letztendlich auch stark auf die Böden, denn überall, wo gewachsener Boden überbaut wird, gehen auch die damit verbundenen Bodenfunktionen (u. a. Wasseraufnahme- und -speicherkapazität) verloren. Vom DAS-Handlungsfeld „Boden“ wird im Indikatorenbericht entsprechend auf diese Indikatoren verwiesen. Ein eigener Indikator speziell für das Handlungsfeld Boden wird weiterhin nicht vorgeschlagen.

Im Themenfeld „Anpassung der Landnutzung, des Flächenmanagements“ geht es zum einen um eine Anpassung der Bewirtschaftungsplanung und hier insbesondere um die land- und forstwirtschaftliche Nutzung. Mit Blick auf die Landwirtschaft wurde ein Indikator zur Dauergrünlandfläche (BO-R-2) etabliert. Grünland stellt eine landwirtschaftliche Nutzungsform dar, die aufgrund der permanenten Bodenbedeckung, der Humusanreicherung und der Artenvielfalt eine geringere Vulnerabilität gegenüber den verschiedenen Wirkungen von Klimaänderungen aufweist als Ackerflächen. Der Rückgang des Grünlands ist unter anderem vor diesem Hintergrund kritisch zu bewerten. An einer weiteren Differenzierung des Grünland-Indikators wurde im Rahmen des FuE-Vorhabens „Beitrag der Satellitenfernerkundung zur Ermittlung von DAS-Indikatoren“ gearbeitet. Mit der Nutzung von Fernerkundungsdaten könnte sich zukünftig die Möglichkeit ergeben, die Gebiete mit besonders umfangreichem Grünlandumbruch zu verorten und eine Differenzierung innerhalb des umgebrochenen Grünlands vorzunehmen. Als mögliche Datenquellen wurden der High Resolution Layer „Permanent Grassland“ der pan-europäischen Komponente des Copernicus-Dienstes zur Landüberwachung und das Digitale Landbedeckungsmodell für Deutschland (LBM-DE2012) des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie identifiziert.

Zum anderen wird innerhalb des Themenfelds „Anpassung der Landnutzung, des Flächenmanagements“ das konkrete Bewirtschaftungsregime auf den Flächen angesprochen. In der Indikatorenarbeit wurde dabei von mehreren Expert*innen bestätigt, dass dem Humusgehalt eine entscheidende Rolle bei der Anpassung der Böden zukommt. Böden mit hohen Gehalten

oder Vorräten an organischem Kohlenstoff bzw. Humus haben in der Regel ein stabileres Gefüge und können mehr Wasser und Nährstoffe (und Schadstoffe) halten als Böden mit nur niedrigen Gehalten, außerdem ist die biologische Aktivität in humusreichen Böden höher. Diese Böden sind daher unter anderem gegenüber Stoffausträgen, Erosion und Schadverdichtung widerstandsfähiger. Einem Response-Indikator zu Humusgehalten von Böden liegt die Hypothese zugrunde, dass Böden mit „optimalen“ Humusgehalten bzw. -vorräten aus derzeitiger Sicht besser auf die steigenden Risiken beispielsweise durch Starkregen und Austrocknung vorbereitet sind als solche mit standortgemäß zu niedrigen (oder im Falle der landwirtschaftlich genutzten Böden auch mit zu hohen Gehalten). Vor diesem Hintergrund wurde am Aufbau entsprechender Indikatoren gearbeitet.

Mit Blick auf die landwirtschaftlichen Böden wurde für den ersten Monitoringbericht 2015 basierend auf BDF Daten ein Fallstudien-Indikator für Bayern angelegt (BO-R-1). Bayern hatte schon damals seine BDF-Daten umfänglicher ausgewertet und eine Zeitreihe zur Entwicklung der C_{org} - und N_t -Gehalte vorgelegt¹⁷. Für den Monitoringbericht 2019 konnte die Zeitreihe des Indikators für die Jahre 2012 und 2015 aktualisiert werden. Für den Monitoringbericht 2023 kann die Landesanstalt für Landwirtschaft Bayern (LfL) nun nach Veröffentlichung aktueller Auswertungen im Rahmen von 35 Jahre Bodendauerbeobachtung in Bayern die Zeitreihe fort-schreiben. Allerdings wird der Indikator von den Humusgehalten auf die Humusvorräte umgestellt und ändert damit auch seinen Titel.

Eine Perspektive für künftige einheitliche Erhebungen zur organischen Bodensubstanz hat das bereits mehrfach erwähnte UBA-Vorhaben zum Klimafolgen-Bodenmonitoring-Verbund aufgezeigt. Hier wurden Anforderungen an die Datenerhebung zur besseren Vergleichbarkeit der Daten und Repräsentanz der Messtandorte formuliert.

Die Bodenzustandserhebung Landwirtschaft (BZE-LW) wird in Zukunft eine geeignete Datengrundlage für die landwirtschaftlichen Böden liefern, sobald die Wiederholungserhebung stattgefunden hat.

Für das DAS-Handlungsfeld „Wald und Forstwirtschaft“ wurde ein Indikator zum Humusvorrat basierend auf den BZE-Daten entwickelt (FW-R-3). Er lehnt sich eng an die Methodik an, die der nationalen Treibhausgas-Berichterstattung zum Kyoto-Protokoll (für C_{org}) zugrunde liegt.

2.2.2.2 Vermeidung von Schadverdichtung und Erosion

Zu spezifischeren Maßnahmen des Bodenschutzes wie zur Vermeidung von Erosion und Bodenverdichtung wurde zwar schon für den ersten Monitoringbericht 2015 diskutiert, es konnten aber keine geeigneten Datenquellen für eine indikatorenbasierte Darstellung identifiziert werden. Auch die Umstellung der landwirtschaftlichen Bodenbearbeitung hin zu wassersparender Flächenbewirtschaftung als Anpassungsreaktion der Landwirtschaft (zum Beispiel durch pfluglosen Bewirtschaftung) lässt sich mit den derzeit verfügbaren Daten der Agrarstatistik nicht

¹⁷ Capriel P. (Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft) 2010: Standorttypische Humusgehalte von Ackerböden in Bayern. Schriftenreihe 05 der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft LfL, Freising, 46 S.

bundesweit abbilden. Indikationsmöglichkeiten wurden erneut im Rahmen des FuE-Vorhabens „Beitrag der Satellitenfernerkundung zur Ermittlung von DAS-Indikatoren“ diskutiert. Dabei wurde unter anderem die Möglichkeit in den Blick genommen, mit einer satellitenbildgestützten Auswertung zur Kontinuität der Bodenbedeckung auf landwirtschaftlich genutzten Flächen Aussagen zur Anpassung der Bewirtschaftungsplanung (insbesondere im Hinblick auf den Erosionsschutz) zu treffen. Es gibt zwar grundsätzlich nutzbare Datenquellen (wie beispielsweise den „Leaf Area Index“ oder die „Fraction of green vegetation cover“ der globalen Komponente des Copernicus-Dienstes zur Landüberwachung zur Erfassung der Bodenbedeckung und die Corine Land Cover-Daten der pan-europäischen Komponente des Copernicus-Dienstes zur Landüberwachung zur Abgrenzung der Ackerflächen), bisher aber kein fertiges, für diese Fragestellung direkt nutzbares Copernicus-Produkt. Mehrere Detailfragen unter anderem zur zeitlichen Auflösung der Daten (die für die Beurteilung der Kontinuität der Bodenbedeckung hochrelevant ist) wären auf dem Weg zu einem DAS-Indikator zu bearbeiten. Für die zweite Fortschreibung des Monitoringbericht 2023 wurde diese Thematik nicht erneut aufgenommen.

Außerdem wurde unter anderem auch mit Blick auf das Themenfeld „Anpassung der Raum- und Nutzungsstruktur“ (s. Kap. 2.2.2.1) diskutiert, ob sich über eine satellitenbildgestützte Abbildung linearer Landschaftselemente als Windbarrieren zum Erosionsschutz Aussagen zu Anpassungsmaßnahmen zum Erosionsschutz treffen lassen. Eine entsprechende Indikator-darstellung könnte dabei auf diejenigen Räume fokussieren, die nach den Ergebnissen des Vulnerabilitätsnetzwerks als mit hohem Winderosionsrisiko eingestuft worden sind. Daten zu linearen Landschaftselementen werden derzeit im Riparian Zone Layer der lokalen Komponente des Copernicus-Dienstes zur Landüberwachung angeboten („green linear elements“), allerdings nur für die innerhalb des Layers bearbeiteten Auflächen. Technisch ist die Identifizierung von Linearstrukturen mit höchstauflösenden Daten (< 10 m) möglich, und Automatisierungsverfahren hierfür gibt es. Allerdings sind die methodischen Anforderungen nicht zu unterschätzen, und für die Generierung eines DAS-Indikators würden eventuell Datenkosten entstehen (z. B. für RapidEye Daten). Insgesamt wäre die Aufbereitung der Daten mit einem nicht zu unterschätzender personellen und zeitlichen Aufwand verbunden.

2.2.2.3 Übrige Themenfelder

Für die Response-Themenfelder „Aufklärung über Risiken und Gefährdungen“ sowie „Monitoring“ und „Forschung“ konnten keine griffigen Indikationsideen und auch keine sinnvoll verwendbaren Datenquellen identifiziert werden.

2.3 Schnittstellen des Handlungsfelds „Boden“ mit anderen DAS-Handlungsfeldern

Das Handlungsfeld Boden hat enge Verbindungen zu zahlreichen anderen DAS-Handlungsfeldern, die sich mit Bodennutzungen beschäftigen. Hierzu gehören vor allem die Landwirtschaft, die Forstwirtschaft und die Raumordnung. Analog zum Indikator BO-R-1 (Humusgehalte von Acker- und Grünlandböden) ist auch im Handlungsfeld Wald und Forstwirtschaft der Indikator

FW-R-3 (Humusvorrat in Waldböden) angelegt worden. Darüber hinaus ist der zum Querschnittsthema Raum-, Regional- und Bauleitplanung entwickelte Indikator RO-R-5 „Anstieg der Siedlungs- und Verkehrsfläche“, der die tägliche Zunahme der Siedlungs- und Verkehrsfläche und damit den Verlust bzw. die starke Beeinträchtigung natürlicher Bodenfunktionen thematisiert, eng mit dem Handlungsfeld Boden verbunden.