

Regenwürmer und Kleinringelwürmer als Bioindikatoren im Bodenmonitoring

A. Beylich, U. Graefe

Zusammenfassung Monitoring auf Bodendauerbeobachtungsflächen dient vor allem dem Nachweis schleichender Bodenveränderungen anhand langjähriger Zeitreihen. Die Daten aus diesen Untersuchungen liefern überdies eine Referenz für den Bodenzustand unter verschiedenen Nutzungs- und Belastungseinflüssen. Besondere Bedeutung kommt hierbei dem biologischen Bodenzustand zu, der die aktuellen Ökosystemprozesse widerspiegelt. Als faunistische Indikatoren des biologischen Bodenzustands werden auf Bodendauerbeobachtungsflächen in der Regel Regenwürmer untersucht. In mehreren Bundesländern werden außerdem Kleinringelwürmer erfasst, da sie wegen ihrer höheren Diversität feinere Differenzierungen ermöglichen. Am Beispiel einer Fläche mit erhöhten Schwermetallgehalten wird das referenzgestützte Bewertungsverfahren vorgestellt und die Auswirkung des luftbürtigen Schadstoffeintrags auf den biologischen Bodenzustand gezeigt.

Earthworms and microannelids as bioindicators in soil monitoring

Abstract Soil monitoring at permanent soil monitoring sites aims at detecting long-term changes in soil quality. Furthermore, the collected data serve as reference for assessing the soil conditions that develop under specific soil uses and pressures. A matter of particular interest is the biological soil condition that mirrors current ecosystem processes. Primarily earthworms are surveyed at soil monitoring sites as faunistic indicators of the biological soil condition. Additionally, also microannelids are investigated in several German federal states. They show a higher diversity than earthworms and therefore allow for more differentiation. Based on this reference an assessment procedure is presented using the example of a site with elevated heavy metal contents, showing the effect of airborne pollutants on the biological soil condition.

1 Einleitung

Die Bedeutung des Bodens als Medium einer Vielzahl von Ökosystemprozessen – z. B. Nährstoffkreislauf, Senke und Quelle klimarelevanter Gase, Immobilisierung von Schadstoffen, Aufbau und Stabilisierung des Gefüges – wird zunehmend wahrgenommen und hat in den vergangenen 20 Jahren die Aufmerksamkeit von Öffentlichkeit und Politik auf den Schutz der natürlichen Bodenfunktionen und den Erhalt der Bodenqualität gelenkt. Dies hat sich auch in der Verabschiedung von Bundes-Bodenschutzgesetz (BBodSchG) und -verordnung (BBodSchV) niedergeschlagen [1; 2]. Auf europäischer Ebene wurde eine „Thematische Strategie für den Bodenschutz“ formuliert [3]. Über eine Boden-Rahmenrichtlinie als Basis für ein europaweit vergleichbares Vorgehen im Bodenschutz konnte jedoch bisher keine Einigung erzielt werden [4]. Im Hinblick auf bestehende und in der Entwicklung befindliche gesetzliche Vorgaben zum Bodenschutz gewinnen Methoden zur Erfassung und Bewertung

von Beeinträchtigungen der Bodenfunktionen zunehmend an Bedeutung [5]. Eine wichtige Rolle spielt dabei das Monitoring von Bodenparametern, die als Indikatoren für bestimmte Bodenfunktionen dienen können.

Zum einen hat der Boden eine Funktion als Lebensraum für Tiere, Pflanzen und Mikroorganismen, die gemäß BBodSchG nachhaltig zu sichern ist. Diese Funktion wird auch in der „Nationalen Strategie zur biologischen Vielfalt“ der Bundesregierung aufgegriffen [6]. Darüber hinaus sind Bodenorganismen in erheblichem Maß „Dienstleister“ für die Erbringung weiterer natürlicher Bodenfunktionen, wie Stoffab- und -aufbau, die mit der Struktur der Bodenlebensgemeinschaft zusammenhängen. Diese Zusammenhänge sind komplex und die Artengemeinschaft eines Bodens ist nicht vollständig erfassbar. Im Allgemeinen werden für biologische Fragestellungen zur Bodenqualität mehrere zu untersuchende Organismengruppen gemäß ihrer Bedeutung für verschiedene Ökosystemdienstleistungen ausgewählt. So werden unter den Bodentiergruppen Vertreter verschiedener Ernährungstypen, z. B. saprophag/räuberisch, und verschiedener Größenklassen – Makro-, Meso- und Mikrofauna – ausgewählt [7; 8]. Einige Arten haben einen dominierenden Einfluss auf die Bodeneigenschaften und werden daher als „Schlüsselarten“ bezeichnet [9]. Dazu gehören in Mitteleuropa bestimmte Regenwurmartensorten aufgrund ihrer herausragenden Bedeutung für die Zersetzung von Pflanzenrückständen, die Durchmischung im Boden und die Bildung stabiler Aggregate. Regenwürmer (Lumbriciden) als Vertreter der Makrofauna werden daher sehr häufig im Rahmen boden-bioindikatorischer Untersuchungen eingesetzt. Allerdings kommen Regenwürmer in Deutschland im Vergleich mit anderen Organismengruppen nur in geringer Artenzahl vor. Dadurch ist die Möglichkeit zu bioindikatorischen Aussagen eingeschränkt.

Kleinringelwürmer (Enchytraeiden u. a.), die wie die Regenwürmer zu den Ringelwürmern (Anneliden) gehören, sind artenreicher. Als Vertreter der Mesofauna tragen sie in einem anderen Maßstab zur Zersetzung von Pflanzenrückständen und zur Strukturierung des Bodengefüges bei. Kleinringelwürmer kommen auch in stark sauren Waldböden vor, in denen ihre großen Verwandten oft kaum präsent sind. Die Untersuchung beider Gruppen zur Bewertung der Bodenqualität wird daher in einer Reihe von Konzepten und Monitoringprogrammen auf nationaler und internationaler Ebene vorgeschlagen bzw. umgesetzt [10 bis 12].

In den Boden eingetragene potenziell schädliche Stoffe sind je nach Bodeneigenschaften, wie pH-Wert, Humus- und Tongehalt, unterschiedlich gut bioverfügbar. Dementsprechend lassen sich die Wirkungen von Schadstoffen auf die Bodenfauna aus den Schadstoffgehalten meist nicht im Detail vorhersagen und müssen deshalb mit bodenzoologischen Methoden direkt untersucht werden. Mit Untersuchungen der Bodenfauna lassen sich

- Wirkungen bekannter Belastungen auf die Bodenlebensgemeinschaft nachweisen,

Dr. Anneke Beylich, Dipl.-Biol. Ulfert Graefe,
Institut für Angewandte Bodenbiologie GmbH, Hamburg.

Tabelle 1. Messparameter der bodenzoologischen Untersuchungen auf Bodendauerbeobachtungsflächen (nach [15]).

Parameter	Indikatorfunktion
Gesamtabundanz der Regenwürmer in Individuen/m ² Gesamtbiomasse der Regenwürmer in g/m ² Gesamtabundanz der Kleinringelwürmer in Individuen/m ²	Bodenzoologische Indikatoren der biologischen Aktivität im Boden
Artenzusammensetzung und Artenzahl, Abundanz, Dominanz und Frequenz der Arten	Bodenzoologische Indikatoren der Biodiversität im Boden
Vertikalverteilung der Kleinringelwürmer: insgesamt sowie auf Gattungs- und Artebene	Zeiger für die vertikale Ausdehnung und Stärke der biologischen Aktivität
Biomasse und Biomassedominanz der Regenwurmarten	Zeiger für die ökologische Bedeutung der Arten
Funktionelle Kennwerte der Lebensgemeinschaft: Lebensformtypen- und Strategietypen-Spektren, Zeigerwert-Spektren und mittlere Zeigerwerte, Zersetzergesellschaftstyp	Indikatoren für den biologischen Bodenzustand bzw. die integrale Wirkung ökologischer Faktoren auf die Bodenbiozönose

- bisher nicht erkannte Beeinträchtigungen oder Veränderungen der Lebensraumfunktion an einem Standort aufdecken,
 - Sanierungsziele formulieren und überprüfen.
- Zum Nachweis langfristiger schleichender Veränderungen der Bodenfunktionen betreiben die Bundesländer Bodendauerbeobachtungsflächen (BDF). Regenwürmer und Kleinringelwürmer werden als Untersuchungsparameter auf BDF empfohlen [11]. Während Regenwürmer in vielen Bundesländern standardmäßig Bestandteil des BDF-Untersuchungsprogramms sind [13], werden Kleinringelwürmer bisher nur in drei Bundesländern berücksichtigt. Im Folgenden wird anhand von BDF-Untersuchungen dargestellt, wie Ringelwürmer (Regenwürmer und Kleinringelwürmer) als Reaktionsindikatoren die Wirkung von umwelt- oder bewirt-

schaffungsbedingten Bodenveränderungen anzeigen können. Die Verwendung von Regenwürmern als Akkumulationsindikatoren ist ebenfalls möglich, wird hier aber nicht thematisiert (vgl. [5; 14]).

2 Messparameter

Auf BDF werden üblicherweise die Siedlungsdichte (Abundanz) und die Biomasse der Regenwürmer als quantitative Summenparameter erhoben. Außerdem wird ggf. für Kleinringelwürmer die Abundanz und die Vertikalverteilung erfasst. Als qualitativer Parameter wird das Artenspektrum ermittelt, aus dem sich weitere qualitative und aggregierte Parameter ableiten lassen. **Tabelle 1** zeigt beispielhaft den bodenzoologischen Parametersatz, der auf BDF in Schleswig-Holstein, Hamburg und Nordrhein-Westfalen verwendet wird [15]. Für die Erfassung von Regenwürmern und Kleinringelwürmern liegen standardisierte Methoden vor [16; 17].

Die Nutzung der Ringelwürmer als Indikatoren anthropogener verursachter Veränderungen setzt voraus, dass entweder gleichzeitig eine Kontrollfläche mit möglichst ähnlichen Standortbedingungen untersucht wird oder die Bandbreite der Messwerte unter unbeeinträchtigten Bedingungen für den jeweiligen Standortstyp bekannt ist (Referenzwert-

3 Interpretation der Ergebnisse

Die Nutzung der Ringelwürmer als Indikatoren anthropogener verursachter Veränderungen setzt voraus, dass entweder gleichzeitig eine Kontrollfläche mit möglichst ähnlichen Standortbedingungen untersucht wird oder die Bandbreite der Messwerte unter unbeeinträchtigten Bedingungen für den jeweiligen Standortstyp bekannt ist (Referenzwert-

Tabelle 2. Referenzwertbereiche für Abundanz, Biomasse und Artenzahl der Regenwürmer (Regenw.) und Kleinringelwürmer (KleinRW) auf der Basis von BDF-Untersuchungen in Nordwestdeutschland. Ind.: Individuen; Min: Minimum; Max: Maximum; Med: median; n: Anzahl der Untersuchungen; Vn: Vernässungsgrad gemäß Bodenkundlicher Kartieranleitung [23]; epi: epigäisch, en: endogäisch, an: anecisch; +: immer vorhanden, (+): bewirtschaftungsabhängig vorhanden; Abundanzen der Kleinringelwürmer gerundet.

Kategorie	pH Tongehalt Vn	Landnutzung Humusform	n	Abundanz KleinRW in Ind. m ⁻²	Abundanz Regenw. in Ind. m ⁻²	Biomasse Regenw. in g m ⁻²	Artenzahl KleinRW	Artenzahl Regenw.	Lebensformtyp Regenwürmer		
				Min Max Med	Min Max Med	Min Max Med	Min Max Med	Min Max Med	epi	en	an
1	< 3,4	Wald/Heideland; Moder oder Rohhumusformen	35	21 000 155 000 74 000	0 45 14	0 5 1	3 14 7,0	0 3 2,0	+		
2	≥ 3,4 bis 4,2	Wald/Heideland; Moder oder Rohhumusformen	20	25 000 131 000 64 000	2 411 54	> 0 18 8	4 22 15,5	1 6 3,5	+		
3	4,3 bis 5,9 < 8 % Ton	Acker; Mull-Humusformen	13	2 000 37 000 20 000	0 83 32	0 24 12	5 17 12,0	0 3 1,0		+	(+)
4	≥ 5,8 ≥ 8 % Ton	Acker; Mull-Humusformen	23	2 000 50 000 22 000	35 480 133	5 126 45	8 17 12,0	3 7 5,0	(+)	+	+
5	≥ 4,2 Vn 0 bis 4	Grünland; Mull-Humusformen	27	9 000 75 000 29 000	91 584 264	37 335 102	14 28 21,0	2 9 6,0	+	+	+
6	≥ 4,9 Torf Vn 5 bis 6	Nassgrünland; Mull-Humusformen	11	9 000 63 000 34 000	200 484 288	9 114 64	15 22 19,0	4 7 5,0	+	+	

bereich). Da geeignete Kontrollflächen oft nicht verfügbar sind, wird dem zweiten Ansatz langfristig größere Bedeutung zukommen. In den vergangenen fünf bis zehn Jahren wurden mehrere Verfahren zur Ableitung von Referenzwertbereichen für Regenwürmer vorgeschlagen, die u. a. auf Daten von BDF verschiedener Bundesländer basieren [15; 18]. Meistens werden Referenzwertbereiche für Biomasse und/oder Abundanz in Abhängigkeit von Bodenart und Nutzung angegeben. Abundanz und Biomasse unterliegen allerdings stärkeren natürlichen Schwankungen als das Artenspektrum, das daher zusammen mit den daraus abgeleiteten Parametern unerlässlich für den Nachweis von schadstoffbedingten Veränderungen ist. Teils werden dafür Erwartungswerte auf Artebene definiert [19; 20], teils Referenzwerte für das Vorkommen der drei Lebensformtypen der Regenwürmer nach [21] formuliert [22]. Ein Beispiel für diese Vorgehensweise zeigt **Tabelle 2**, basierend auf 129 Datensätzen von BDF in Nordwestdeutschland, die neben den Regenwürmern auch die Kleinringelwürmer berücksichtigt [24]. Es wird deutlich, dass die Referenzwertbereiche insbesondere für die quantitativen Parameter recht weit sind, da die Messgrößen außer von Bodeneigenschaften auch stark von Bewirtschaftungsaktivitäten und dem Witterungsverlauf beeinflusst werden. Folglich sind Informationen hierzu notwendig, um die Ergebnisse richtig interpretieren zu können und um Belastungen zu erkennen, die über den „Störungsstress“, den die übliche Bewirtschaftung für die Bodenfauna darstellt, hinausgehen.

4 Auswirkungen luftbürtiger Schadstoffe auf Regenwürmer und Kleinringelwürmer

Über die Luft gelangen organische wie anorganische Stoffe in den Boden, die direkt toxisch wirken oder die Toxizität oder Verfügbarkeit anderer Stoffe beeinflussen. Die Ökotoxizität einzelner Stoffe oder Stoffgruppen ist aus Laborversuchen zum Teil recht gut bekannt. Die Wirkung unter natürlichen Bedingungen, also z. B. ohne optimierte Temperatur- und Feuchteverhältnisse, bei begrenzten Nahrungsressourcen und unter Konkurrenzdruck kann allerdings deutlich von der im Labor festgestellten Wirkung abweichen. Hinzu kommt, dass in Laborversuchen nur wenige gut im Labor zu handhabende Arten, z. B. der Kompostwurm *Eisenia fetida*, und meist nicht die Effekte von Schadstoffgemischen untersucht werden. Im Freiland liegen die Schadstoffe in der Regel nicht nur in unterschiedlichen Gemischen, sondern auch in kleinräumig unterschiedlichen

Konzentrationen (Vertikalgradienten) vor. Unter diesen Verhältnissen äußern sich Schadstoffwirkungen u. a. in Form von Veränderungen der Artenzusammensetzung oder der Anteile einzelner Arten an der Lebensgemeinschaft und damit in der Verschiebung von Nahrungs- und Konkurrenzbeziehungen.

4.1 Fallbeispiel atmosphärischer Schwermetalleintrag

Die Verwendung der Ringelwürmer als Bioindikatoren zur Beurteilung schädlicher Bodenveränderungen in Bezug auf die Lebensraumfunktion des Bodens soll am Beispiel der BDF Duisburg-Biegerhof in Nordrhein-Westfalen verdeutlicht werden. Die Fläche weist aufgrund der jahrzehntelangen Immissionsbelastung erhöhte Schwermetallgehalte im Boden auf. Bei dieser auf einem städtischen Parkrasen gelegenen Fläche übersteigen die Gehalte der Schwermetalle Blei, Zink, Nickel und Cadmium die Vorsorgewerte der BBodSchV [2] teils erheblich. Die Gehalte sind in der organischen Auflage und den obersten Zentimetern des Mineralbodens am höchsten und gehen mit der Tiefe zurück (siehe **Tabelle 5**).

Die Regenwurmbiomasse der BDF schwankt im Vergleich mit anderen Grünland-BDF um einen Wert im mittleren Bereich (vgl. **Tabelle 2**, Kategorie 5). Die Differenzierung nach Lebensformtypen enthüllt allerdings den Ausfall der endogäischen Regenwürmer, die sonst auf allen Grünland- und Parkflächen vorkommen (**Bild 1**). Endogäische Regenwürmer leben im oberen Mineralboden, wo sie sich durch den Boden fressen. In dieser Tiefe (0 bis 10 cm) sind die von [25] vorgeschlagenen Bodenwerte¹⁾ für den Expositionspfad Boden – Bodenorganismen für Blei und Zink deutlich überschritten, sodass hier mit Wirkungen auf die Bodenorganismen zu rechnen ist. Auch die geringmächtige organische Auflage weist hohe Schwermetallgehalte auf, die Schwermetalle sind dort durch die Bindung an organische Substanz jedoch weniger gut verfügbar als im Mineralboden. Für die tiefgrabenden anecischen und die epigäischen (streubewohnenden) Regenwürmer, die sich hauptsächlich von der Streu an der Bodenoberfläche ernähren, sind keine Beeinträchtigungen feststellbar. Im Vergleich mit anderen Grünlandstandorten sind darüber hinaus Artenzahl (**Bild 2**) und Abundanz der Kleinringelwürmer in Duisburg-Biegerhof

¹⁾ In der BBodSchV sind keine Prüfwerte für den Pfad Boden – Bodenorganismen vorgesehen. Um bei Belastungen oberhalb der Vorsorgewerte Schädigungsschwellen für die Bodenlebensgemeinschaft abzuschätzen, wurden von [25] Bodenwerte aus ökotoxikologischen Daten im deutlichen Wirkungsbereich abgeleitet, die vom Charakter her Prüfwerten entsprechen.

Tabelle 3. Schwermetallgehalte im Bodenprofil der BDF Duisburg-Biegerhof in mg/kg Trockensubstanz, Königswasseraufschluss, Vorsorge- und Prüfwerte der BBodSchV für den Pfad Boden – Mensch sowie Bodenwerte für den Pfad Boden – Bodenorganismen nach [25].
Überschrittene Vorsorge-/Bodenwerte sind grau unterlegt

Tiefe in cm	As	Pb	Cd	Cr	Cu	Ni	Hg	Zn
organische Auflage	14	552	6,61	46	44	30	0,29	921
0 bis 2	18	493	3,85	50	39	29	0,19	524
5 bis 10	16	255	3,65	44	34	26	0,22	432
10 bis 30	13	96	2,50	41	24	28	0,15	333
30 bis 60	11	37	0,54	48	16	33	0,05	124
60 bis 90	9	26	0,19	45	12	33	0,03	72
Vorsorgewert BBodSchV für Lehm/Schluff und pH < 6,0	–	70	0,4	60	40	15	0,5	60
Prüfwert BBodSchV Parkanlagen	125	1000	50	1000	–	350	50	–
Bodenwertvorschlag Bodenorganismen	25	150	7	–	120	70	1,5	150

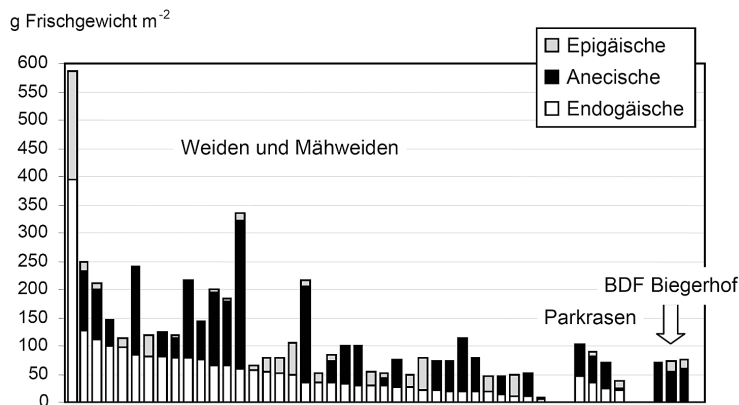


Bild 1. Biomassen der Regenwürmer auf BDF in Nordwestdeutschland, differenziert nach Lebensformtypen und absteigend sortiert nach der Biomasse der Endogäischen. Aufnahmen von fünfzehn Weiden/Mähweiden (je ein bis drei Untersuchungstermine) und zwei städtischen Parkrasen in Kiel und Hamburg (je zwei Untersuchungstermine). Am Standort Duisburg-Biegerhof (Parkrasen) fehlen die endogäischen Regenwürmer an allen drei Untersuchungsterminen.

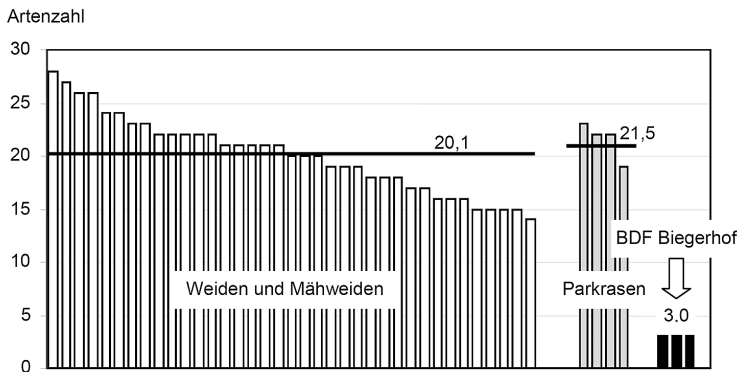


Bild 2. Artenzahlen der Kleinringelwürmer auf den gleichen BDF wie in Bild 1 in absteigender Sortierung: landwirtschaftlich genutztes Grünland (15 Standorte mit je ein bis drei Untersuchungsterminen), zwei städtische Parkrasen in Kiel bzw. Hamburg (je zwei Untersuchungstermine), BDF Duisburg-Biegerhof (Parkrasen; drei Untersuchungstermine). Horizontale Linien: Mittelwerte der Aufnahmen von Weiden und Mähweiden bzw. der beiden Parkrasen.

stark reduziert und liegen unterhalb des Referenzwertbereichs für vergleichbare Standorte. Außerdem konzentrieren sich die wenigen Tiere in den obersten 2,5 cm. Der tiefere Bereich ist nahezu frei von Kleinringelwürmern, was ebenfalls für ungünstige Bedingungen im Mineralboden spricht. Die Lebensraumfunktion für Bodenorganismen ist daher als deutlich eingeschränkt zu bewerten. Die außerdem festgestellte Verdichtung des Oberbodens [26] ist möglicherweise ein Sekundäreffekt seiner geringen Belebtheit.

5 Fazit und Ausblick

Während für die Erfassung von Regenwürmern und Kleinringelwürmern standardisierte Methoden vorliegen [16; 17; 27], gibt es noch Defizite hinsichtlich der Standardisierung der Bewertungsmethoden. Die hier zitierten Bewertungsansätze [13] sind jeweils für einen begrenzten geografischen Raum innerhalb Deutschlands entwickelt worden und bisher nicht systematisch untereinander abgeglichen und auf die Übertragbarkeit auf andere Naturräume geprüft. Da sich die verschiedenen Ansätze zwar in der statistischen Ableitung von Referenzwertbereichen unterscheiden, weniger jedoch in der inhaltlichen Konzeption, wird in einer bundesweiten Validierung kein grundsätzliches Problem gesehen. Hinderlich ist wahrscheinlich die regional unterschiedliche Datenbasis, da das BDF-Programm derzeit das einzige Monitoringprogramm in Deutschland ist, in dem Regenwürmer und in geringem Umfang andere Tiergruppen untersucht werden, jedoch nicht in allen Bundesländern und für alle Nutzungstypen. Eine standardisierte Bewertungsmethode würde über die Bewertung stofflicher Belastungen hinaus auch auf andere Fragestellungen, z. B. der Landschaftsplanung, des Klimawandels oder der Auswirkungen von gentechnisch veränderten Organismen (GVO), anwendbar sein.

Danksagung

Die bodenzoologischen Untersuchungen auf Bodendauerbeobachtungsflächen erfolgten im Auftrag des Landesamts für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume Schleswig-Holstein (LLUR), des Landesamts für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (LANUV) und des Geologischen Landesamts Hamburg. Dem LANUV danken wir für die Schwermetalldaten der BDF Duisburg-Biegerhof.

Literatur

[1] Gesetz zum Schutz vor schädlichen Bodenveränderungen und zur Sanierung von Altlasten (Bundes-Bodenschutzgesetz – BBodSchG) vom 17. März 1998. BGBl. I, S. 502, zul. geänd. durch Artikel 3 des Gesetzes vom 9. Dezember 2004. BGBl. I, S. 3214.

[2] Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV) vom 12. Juli 1999. BGBl. I, S. 1554, zul. geänd. durch Artikel 16 des Gesetzes vom 31. Juli 2009. BGBl. I, S. 2585.

[3] Thematic strategy for soil protection. Communication from the commission to the council, the European Parliament, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. COM (2006) 231 final.

[4] Proposal for a Directive of the European Parliament and of the Council establishing a framework for the protection of soil and amending Directive 2004/35/EC. COM (2006) 232 final.

[5] Römcke, J.: Standardisierte Methoden für das biologische Monitoring von Böden in der Europäischen Union.

[6] Nationale Strategie zur biologischen Vielfalt. Reihe Umweltpolitik. Hrsg.: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. Berlin 2007.

[7] Semenzin, E.; Critto, A.; Marcomini, A.: Ecosystem impairment evaluation on biodiversity and functional diversity for contaminated soil assessment. Integrated Environm. Assessm. Managem. 5 (2009) Nr. 3, S. 399-413.

[8] Breure, A. M.; Mulder, C.; Römcke, J.; Ruf, A.: Ecological classification and assessment concepts in soil protection. Ecotoxicol. Environm. Saf. 62 (2005), S. 211-229.

[9] Lavelle, P.; Bignell, D.; Lepage, M.: Soil function in a changing world: The role of invertebrate ecosystem engineers. Eur. J. Soil Biol. 33 (1997), S. 159-193.

[10] Rutgers, M.; Mulder, C.; Schouten, A. J. (Hrsg.): Soil ecosystem profiling in the Netherlands with ten references for

- biological soil quality. RIVM Report 607604009. Bilthoven 2008.
- [11] 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. Berlin: Erich Schmidt 2000.
- [12] Kibblewhite, M. G.; Jones, R. J. A.; Baritz, R.; Huber, S.; Arrouays, D.; Micheli, E.; Stephens, M.: ENVASSO Final Report Part I: Scientific and Technical Activities. ENVASSO Project (Contract O22713) coordinated by Cranfield University, UK, for Scientific Support to Policy, European Commission 6th Framework Research Programme, 2008. www.envasso.com/Publications/ENV_D11_FinalRep_prt2bk.pdf
- [13] Bodenbiologische Bewertung von Boden-Dauerbeobachtungsflächen (BDF) anhand von Lumbriciden. Texte 34/07. Hrsg.: Umweltbundesamt. Dessau 2007.
- [14] Tischer, S.: Lumbriciden als Akkumulations-Bioindikatoren für Schwermetallbelastungen in Böden. Gefahrstoffe – Reinhalt. Luft 69 (2009) Nr. 10, S. 401-406.
- [15] Graefe, U.; Gehrman, J.; Stempelmann, I.: Bodenzoologisches Monitoring auf EU-Level II-Dauerbeobachtungsflächen in Nordrhein-Westfalen. Mitt. Dt. Bodenkundl. Ges. 96 (2001), S. 331-332.
- [16] DIN ISO 23611-1: Bodenbeschaffenheit – Probenahme von Wirbellosen im Boden – Teil 1: Handauslese und Formalinextraktion von Regenwürmern. Berlin: Beuth 2007.
- [17] DIN ISO 23611-3: Bodenbeschaffenheit – Probenahme von Wirbellosen im Boden – Teil 3: Probenahme und Bodenextraktion von Enchytraeen. Berlin: Beuth 2007.
- [18] Römbke, J.; Jänsch, S.; Didden, W.: The use of earthworms in ecological soil classification and assessment concepts. Ecotoxicol. Environm. Saf. 62 (2005), S. 249-265.
- [19] Krück, S.; Joschko, M.; Schultz-Sternberg, R.; Kroschewski, B.; Tessmann, J.: A classification scheme for earthworm populations (*Lumbricidae*) in cultivated agricultural soils in Brandenburg, Germany. J. Plant Nutr. Soil Sci. 169 (2006), S. 651-660.
- [20] Tischer, S.: Erfassung und Bewertung von Lumbricidenvorkommen sowie deren Schwermetallgehalte auf BDF von Sachsen-Anhalt und Thüringen. In: Bodenbiologische Bewertung von Boden-Dauerbeobachtungsflächen (BDF) anhand von Lumbriciden. Texte 34/07. Hrsg.: Umweltbundesamt. Dessau 2007.
- [21] Bouché, M. B.: Lombriciens de France. Écologie et Systématique. Hrsg.: Institut National de la Recherche Agronomique. Paris 1972.
- [22] Ehrmann, O.; Brauckmann, H.-J.; Emmerling, C.; Fründ, H.-C.: Erfassung und Bewertung von Regenwurmpopulationen – Vorschlag für ein mehrstufiges Bewertungsverfahren. In: Bodenbiologische Bewertung von Boden-Dauerbeobachtungsflächen (BDF) anhand von Lumbriciden. Texte 34/07. Hrsg.: Umweltbundesamt. Dessau 2007.
- [23] Bodenkundliche Kartieranleitung. Hrsg.: Ad-hoc-AG Boden. 5. Aufl. Hannover 2005.
- [24] Beylich, A.; Graefe, U.: Investigations of annelids at soil monitoring sites in Northern Germany: reference ranges and time-series data. Soil Organisms 81 (2009) Nr. 2, S. 175-196.
- [25] Römbke, J.; Jänsch, S.; Schallnaß, H.-J.; Terytze, K.: Bodenwerte für den Pfad „Boden – Bodenorganismen“ für 19 Schadstoffe. Bodenschutz 4 (2006), S. 112-116.
- [26] Haag, R.; Stempelmann, I.; Haider, J.: Bodenbiologische Untersuchungen auf Bodendauerbeobachtungsflächen in Nordrhein-Westfalen im Zeitraum 1995 – 2007. Hrsg.: Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (LANUV NRW). Essen 2009. www.lanuv.nrw.de/boden/pdf/Bericht_Bio_BDF_30_11_09.pdf
- [27] VDI 4230, Blatt 2: Biologische Verfahren zur Erfassung der Wirkung von Luftverunreinigungen (Bioindikation). Passives Biomonitoring mit Regenwürmern als Akkumulationsindikatoren. Berlin: Beuth 2008.