

Beurteilung von Bodenverdichtungen aus Sicht der Bodenbiologie

Berndt-Michael Wilke, Anneke Beylich und Hans-Rudolf Oberholzer

Prof. Dr. Dr. Berndt-Michael Wilke
Studium des Erwerbsgartenbaus an der TU Berlin, Promotion im Fach Bodenkunde an der TU München, Habilitation Universität Bayreuth, GD Institut für Ökologie der TU Berlin, Leiter FG Abfallbelastung der Landschaft, Obmann BVB FA Biologische Bewertung von Böden, Vorstandsmitglied BVB, DBG (Vizepräsident)

Dr. Anneke Beylich
Studium der Biologie und Bodenkunde an der Universität Hamburg. 1995–2003 wissenschaftliche Mitarbeiterin an der Freien Universität Berlin; Promotion zur Toxizität von Schwermetallen für Bodenorganismen. Geschäftsführerin beim IFAB Institut für Angewandte Bodenbiologie GmbH in Hamburg seit 1997. Lehrauftrag an der Universität Hamburg.

Dr. Hans-Rudolf Oberholzer
Studium Naturwissenschaften an der ETH Zürich, Fachgebiet Biologie, Promotion über biologische N-Bindung bei Ackerbohnen, Leiter der Gruppe Bodenbiologie in der Forschungsgruppe Bodenfruchtbarkeit/Bodenschutz an Agroscope Reckenholz. Tätigkeiten: ART, Arbeitsgebiete: Beurteilung der Bodenqualität und Dauerbeobachtung mit bodenmikrobiologischen Parametern, Auswirkungen von Bodenverdichtungen auf Bodenorganismen, Abschätzung von Auswirkungen von Bewirtschaftungsmaßnahmen auf die Bodenqualität in Ökobilanzen

Zusammenfassung

Bodenverdichtungen werden vornehmlich unter dem Aspekt ihrer Wirkungen auf den Luft- und Wasserkreislauf sowie die Ertragsfähigkeit von Böden untersucht. Wirkungen auf Bodenorganismen finden kaum Beachtung. Ziel der vorliegenden Studie war es, Literaturdaten zu sichten und wenn möglich Schwellenwerte für schädliche Bodenveränderungen durch Verdichtungen in Bezug auf die Lebensraumfunktion für Bodenorganismen abzuleiten. Dazu wurden alle relevanten Untersuchungsergebnisse in einer Datenbank für statistische Auswertungen gespeichert.

Unsere Literaturrecherche zeigte, dass sowohl bei zoologischen wie auch bei mikrobiologischen Parametern bei geringen bis starken Verdichtungen positive und negative Veränderungen vorkommen. Eindeutige Beziehungen zwischen Schadwirkungen und physikalischen Parametern ließen sich nicht ableiten. Da in vielen Untersuchungen bodenphysikalisch relevante Parameter nur in ungenügendem Umfang erhoben wurden, konnten die Ergebnisse vieler Arbeiten nicht in die Datenbank aufgenommen und verwendet werden. Eine Bestätigung der vorgeschlagenen physikalischen Schwellenwerte war nicht möglich. Allerdings traten bei Verdichtungen auf effektive Lagerungsdichten $> 1,7 \text{ g/cm}^3$ in Laborexperimenten nur noch negative Veränderungen von Biomasse und C-Mineralisation auf, ein deutliches Indiz, dass ein Schwellenwert in diesem Bereich auch im Hinblick auf eine Beeinträchtigung der biologischen Bodenfunktionen gerechtfertigt erscheint.

◆ **Schlagerwörter:** Bodenverdichtung, Bodenorganismen, bodenbiologische Prozesse, Schwellenwerte

Summary

Soil compaction is mainly investigated with respect to air- and water capacity and productivity of soils. Effects of soil compaction on soil organisms do not attract interest of soil scientists. Therefore, the present report focussed on a literature evaluation with respect to detrimental effects of soil compaction on the habitat function of soils for soil organisms and to derive soil physical threshold values with regard to these effects. For the statistical evaluation of these values all relevant data were compiled in a data base.

Our studies showed that minor to heavy soil compaction revealed negative as well as positive effects on soil faunal and microbiological parameters. Significant relations between detrimental effects and soil physical parameters could not be detected. In numerous studies the analysis of relevant soil physical parameters was not sufficient. Therefore these results could not be included in the data base and used for evaluation. Already existing physical threshold values for the identification of detrimental soil compaction

could not be confirmed. Nevertheless, effective bulk densities $> 1.7 \text{ g/cm}^3$ revealed only negative effects on microbial biomass and C-mineralisation in laboratory experiments giving evidence that a threshold value in this range could be also relevant for biological soil functions.

◆ **Keywords:** soil compaction, soil organisms, soil biological processes, threshold values

1. Einleitung

Unsere Böden sind eine knappe, nicht erneuerbare Ressource. Das Bundes-Bodenschutzgesetz [1] verlangt sich so zu verhalten, dass schädliche Bodenveränderungen nicht hervorgerufen werden (§ 4 Abs. 1). Insbesondere sind die natürlichen Bodenfunktionen zu schützen. Dazu zählen aus Sicht der Bodenbiologie die Fähigkeit des Bodens Bodenorganismen einen Lebensraum zu bieten ebenso wie der Erhalt der Nährstoffkreisläufe und der Stoffumwandlungseigenschaften von Böden, an denen Bodenorganismen maßgeblich beteiligt sind. Bei der landwirtschaftlichen Bodennutzung wird die nachhaltige Sicherung der Bodenfruchtbarkeit und Leistungsfähigkeit des Bodens durch die gute fachliche Praxis verlangt (§17 Abs. 2). Hierzu zählt u. a. der Erhalt oder die Förderung der biologischen Aktivität des Bodens durch eine entsprechende Fruchtfolgegestaltung sowie eine standort- und witterungsangepasste Bodenbearbeitung.

Schädliche Bodenveränderungen werden sowohl durch stoffliche als auch nichtstoffliche Belastungen wie Bodenschadverdichtungen hervorgerufen. Bisher wurden Bodenverdichtungen im Hinblick auf die Bodenfunktionen Luft- und Wasserkreislauf sowie Ertragsfähigkeit bewertet [12]. Wirkungen auf Bodenorganismen und deren Umsatzleistungen fanden vergleichsweise wenig Beachtung.

Vorsorge-, Prüf- und Maßnahmenwerte zur Bewertung von Schadverdichtungen liegen nicht vor [2]. Von Bodenphysikern wurden jedoch Schwellenwerte zur Erkennung von Bodenschadverdichtungen definiert [12]. Am besten geeignet ist der Parameter Luftkapazität. Es ist eine elementare Bodeneigenschaft, die einen direkten Bezug zur Speicherung und Leitung von Luft in Böden hat und sich leicht bestimmen lässt. Am zweitbesten eignet sich nach [12] die gesättigte Wasserleitfähigkeit zur Identifikation von Schadverdichtungen, gefolgt von der effektiven Lagerungsdichte.

Da nur relativ wenige Arbeiten zu Wirkungen von Schadverdichtungen auf Bodenorganismen vorliegen, hat sich der Fachausschuss Biologische Bewertung von Böden des BVB zum Ziel gesetzt, sich einen Überblick zu den Wirkungen der Verdichtungen zu verschaffen. Dabei sollten folgende Fragen geklärt werden:

1. Wie ist der Kenntnisstand zu Wirkungen von Bodenverdichtungen auf Bodenorganismen (Mikroorganismen und Bodenfauna)?
2. Welche biologischen Parameter werden untersucht?
3. Wie können Verdichtungsschäden aus bodenbiologischer Sicht bewertet werden?
4. Wo liegen Erheblichkeitsschwellen und sind die von [12] vorgeschlagenen bodenphysikalischen Schwellenwerte auch für Bodenorganismen relevant?

Unsere Arbeiten konzentrierten sich auf eine Auswertung bisher veröffentlichter Arbeiten auf landwirt-

schaftlich genutzten Flächen. Für die Ableitung von Schwellenwerten wurden sämtliche publizierten Ergebnisse in einer Datenbank zusammengefasst. Auf Bodenverdichtung forstwirtschaftlich genutzter Flächen wird nicht speziell eingegangen, da in der Forstwirtschaft Strategien entwickelt und empfohlen werden, flächenhaftes Befahren zu vermeiden und die Befahrung auf langfristig genutzte Fahrtrassen zu beschränken [16]. Auf diesen werden damit Schäden durch Verdichtung in Kauf genommen, um die übrige Fläche zu schonen.

2. Wirkungen von Bodenverdichtungen auf die Bodenfauna

Negative Wirkungen von Bodenverdichtungen auf verschiedene Bodentiergruppen sind mit Belastungsversuchen in Freiland und Labor nachgewiesen. Häufig ist in den verdichteten Varianten die Biomasse oder die Siedlungsdichte (Abundanz) der Tiere deutlich verringert [9] [14]. Gleichzeitig kann es zu einer Verringerung der Artenzahl kommen [5]. Tiergruppen der Mesofauna mit einem Körperdurchmesser von ca. 0,1 bis 2 mm (z. B. Springschwänze, Milben, Kleinringelwürmer) bewohnen hauptsächlich weite Grobporen und sind oft nicht oder eingeschränkt grabfähig. Eine Verminderung des Grobporenanteils verringert ihren Lebensraum. Der Effekt ist teilweise artspezifisch und kann weitere Effekte, z. B. veränderte Konkurrenzsituation durch Ausfall einzelner Arten nach sich ziehen. Für grabfähige Arten, wie die zur Makrofauna gehörenden Regenwürmer, wird die Grabtätigkeit durch Verdichtung erschwert. Auch bei gleich bleibender Siedlungsdichte wurden daher Auswirkungen auf die Aktivität der Tiere festgestellt. Beispielsweise können das Gangvolumen und die gesamte Ganglänge von Regenwürmern nach starker Bodenbelastung drastisch abnehmen [11]. Ein starker Rückgang der Siedlungsdichte und/oder Aktivität von Schlüsselarten, wie z. B. tiefgrabenden Regenwürmern, die den Bodenlebensraum durch ihre Tätigkeit erheblich mitgestalten, führt zu Veränderungen des Bodens, die auch auf andere Bodenfunktionen Auswirkungen haben.

Ein indirekter Effekt der Verdichtung ist die Entstehung von Staunässe durch verringerte Wasserleitfähigkeit. Das Absinken der O₂-Gehalte im Boden bis hin zur Anaerobie hat ebenfalls Veränderungen im Artenspektrum der Bodenfauna zur Folge.

In einigen Fällen wurden scheinbar positive Effekte von Bodenverdichtung auf Bodenorganismen festgestellt, die sich aber oft auf einzelne Artengruppen oder Parameter beziehen. Beispielsweise wurde bei Laboruntersuchungen an Regenwürmern eine erhöhte Anzahl Gänge oder Kothäufchen als Reaktion auf eine Verdichtung festgestellt [3] [6]. Die Gesamtlänge des Gangsystems und die Porenkontinuität nehmen in den Versuchen jedoch gleichzeitig ab, so dass der Effekt insgesamt nicht als positiv zu werten ist.

3. Wirkungen von Bodenverdichtungen auf die Bodenmikroorganismen

Die Auswirkungen von Bodenverdichtung auf die Bodenmikroorganismen und ihre Aktivität sind sehr komplex und von vielen Faktoren abhängig. Durch Verdichtung wird in den meisten Fällen das Grobporen-

Parameter	Schwellenwert
Luftkapazität	5 Vol.-%
Gesättigte Wasserleitfähigkeit	10 cm d ⁻¹
Effektive Lagerungsdichte $L_d = \rho t (g\ cm^{-3}) + 0.009\ Ton\ (%)$	Ld4 1.8 – 2.0 Ld5 > 2.0

Tabelle 1
Schadensschwellenwerte zur Erkennung einer Bodenschadverdichtung (n. [12])

volumen verringert. Dadurch wird bei gegebenen Klima- und Feuchtigkeitsbedingungen der Luft und Wasserhaushalt im Boden und damit die Lebensbedingungen der Mikroorganismen in Bezug auf Sauerstoff bzw. CO₂-Gehalt der Bodenluft und das Redoxpotential beeinflusst. Grundlegende Ergebnisse dazu zeigten [4], dass die Limitierung der Durchlüftung je nach Boden bei unterschiedlicher Wassersättigung liegen kann. Beispielhaft für die Komplexität dieser Untersuchungen sind die Arbeiten von [7]. Eine identische Befahrung führte beim Weidestandort mit einer ursprünglichen Trockenrohddichte von 1.0 g/cm³ zu einer Verdichtung, nicht jedoch beim Getreidestandort mit einer ursprünglichen Dichte von 1.3 g/cm³. Trotzdem konnte er bei beiden Standorten eine Reduktion des CO₂-Flusses im Feld und der Netto-N-Mineralisation an Bodenzylindern im Labor feststellen. Die mikrobielle Biomasse änderte sich nicht signifikant und zeigte je nach Messmethode eine Zu- oder Abnahme. In einem Laborexperiment mit Böden von 3 Standorten mit unterschiedlichen Kulturen, 3 Verdichtungsstufen und 3 Bodenfeuchten (Wasserpotential) stellte [8] fest, dass die C-Mineralisation mit dem Wassergehalt korreliert war. Die N-Mineralisation zeigte eine ähnliche Korrelation allerdings nur bei wenig verdichteten Proben, weil bei den stärker verdichteten wahrscheinlich Denitrifikation auftrat. Die mikrobielle Biomasse gemessen mit der Fumigations-Methode nahm mit steigendem Wassergehalt ab, wenn sie jedoch mit der substratinduzierten Respiration-Methode gemessen wurde, konnte keine signifikante Veränderung festgestellt werden. [15] stellten bei Labormessungen an Zylinderproben zunehmende Denitrifikation von unterschiedlich verdichteten Stellen aus einem Kartoffelfeld fest, wenn das Porenvolumen zu mehr als 70 % wassergefüllt war, während die CO₂-Produktion nur beim stärksten verdichteten Verfahren und erst bei 98 % wassergefüllter

Tabelle 2
Struktur der Datenbank

Themenfeld	Parameter
Referenz	Autor, Zeitschrift
Geographischer Hintergrund	Standort, durchschnittlicher Niederschlag und Temperatur, Klimazone
Organismen	Organismen, Gruppe, Spezies
Bodendaten	Bodentyp, Textur (Sand, Schluff, Ton), SOM, Nt, pH-Wert
Art der Verdichtung	Art der Verdichtung (Feld-/Laborversuch) Bezeichnung der Verdichtung, Art der Bodennutzung, Pflanze, Art der Verdichtung (Befahrung, künstliche Verdichtung), Wassergehalt des Bodens, Dauer der Verdichtung
Physikalische Parameter (gemessene Daten)	Probenahmetiefe, Trockenrohddichte, Gesamtporenvolumen, Feldkapazität, Luftkapazität (= weite Grobporen), Luftdurchlässigkeit, Wasserdurchlässigkeit
Physikalische Parameter (berechnete Daten)	Luftkapazität, GVP, effektive Lagerungsdichte
Biologische Endpunkte	Parameter, Methodik der Probenahme, Zahl der Wiederholungen, Ergebnisse der Kontrolle, der verdichteten Varianten, Maßeinheit, Abweichung von der Kontrolle, Signifikanz, Bemerkungen zu Ergebnissen.

Tabelle 3
Anzahl der berücksichtigten Freiland- und Laboruntersuchungen, die bestimmte Tiergruppen bzw. Parameter abdecken (Bodenfauna)

Tiergruppe	Zahl der ausgewerteten Datensätze		
	Freiland	Labor	Σ
Regenwürmer	8	5	13
Enchyträen	4	–	4
Springschwänze	6	1	7
Milben	3	–	3
Mikroarthropoden	1	–	1
Nematoden	1	–	1
Parameter			
Abundanz (abs. Häufigkeit)	16	1	17
Dominanz (rel. Häufigkeit)	1	–	1
Zahl der Spezies	3	–	3
Biomasse	7	–	7
Losungsproduktion	–	2	2
Zahl der Regenwurmgänge	–	2	2
Ganglänge, -volumen	–	2	2
Andere	2	1	3

Tabelle 4
Anzahl der berücksichtigten Freiland- und Laboruntersuchungen, die bestimmte mikrobielle Untersuchungsparameter abdecken

Parameter	Zahl der ausgewerteten Datensätze	
	Freiland	Labor
Mikrobielle Biomasse	13	8
C Mineralisation	6	9
N Mineralisation	4	8
Denitrifizierung	3	1
qCO ₂	3	0
Gesamt	29	26

Poren reduziert war. [13] stellten durch Verdichtung eine verspätete Reife, einen reduzierten Maisertrag und aufgrund einer reduzierten N-Mineralisation einen geringeren N-Entzug als beim normal gepflügten Verfahren fest.

4. Ableitung von Schwellenwerten

Für die Diagnose einer Bodenschadverdichtung wurden aus Sicht der Bodenphysik die Luftkapazität, die effektive Lagerungsdichte und die gesättigte Wasserleitfähigkeit als Kriterien herangezogen [12]. Bei Überschreiten der in Tabelle 1 zusammengestellten Werte ist von einer schädlichen Bodenverdichtung auszugehen. Ob diese Schwellenwerte auch für Bodenorganismen und ihre Umsatzleistungen relevant sind, sollte im Rahmen unserer Arbeiten geprüft werden. Dazu wurde eine Datenbank angelegt, in der alle bislang veröffentlichten Untersuchungsergebnisse über Wirkun-

Tabelle 5
Wertebereich der Trockenrohdichten, getrennt nach Kontrollen und verdichteten Varianten der ausgewerteten Publikationen

	Trockenrohdichte [g cm ⁻³]					
	Mikrobiologie			Fauna		
	Kontrollen	Verdichtet	Änderung in % der Kontrolle	Kontrollen	Verdichtet	Änderung in % der Kontrolle
Median	1,20	1,42	21,50	1,30	1,50	13,84
Maximum	1,47	1,80	51,22	1,66	1,81	50,00
Minimum	0,75	0,92	0,00	0,99	1,01	0,94
Datensätze	270	370	370	135	197	197

gen von Verdichtungen auf Bodentiere dokumentiert wurden. Die Auswertung der Daten erfolgte anhand von Regressionsanalysen. Erfasste Themenfelder und Einzelparameter der Datenbank sind Tabelle 2 zu entnehmen. Bei den physikalischen Parametern wurde zwischen gemessenen und berechneten unterschieden. Bei fehlenden Angaben zur Luftkapazität, zur effektiven Lagerungsdichte oder zum Gesamtporenvolumen (GVP) wurden diese ggf. mit Hilfe der vorhandenen Daten berechnet (z. B. effektive Lagerungsdichte $L_d = \rho t [g\ cm^{-3}] + 0,009\ Ton\ [%]$).

Insgesamt wurden 240 Veröffentlichungen ausgewertet. Von diesen eigneten sich nur 32 mikrobiologische und 22 bodenzoologische Untersuchungen für die Ableitung von Schwellenwerten. Ausschlusskriterien waren:

- ◆ Physikalische Zielparame-ter (Trockenrohdichte, Makroporenvolumen) wurden nicht gemessen oder konnten nicht errechnet werden (z. B. wenn nur Angaben zum Eindringwiderstand, Radlast und Befahrungshäufigkeit angegeben wurden)
- ◆ Fehlende Kontrollen
- ◆ Fehlende Rohdaten, nur Ergebnisse statistischer Berechnungen
- ◆ Verdichtungseffekte ließen sich nicht von anderen trennen (Bodenbearbeitung)
- ◆ Reviews ohne Originaldaten, Vorliegen verbal argumentativer Bewertungen

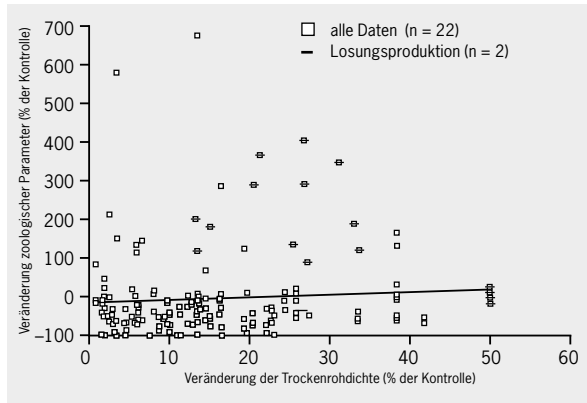
Von den insgesamt 22 ausgewerteten bodenzoologischen Veröffentlichungen befassten sich die meisten Arbeiten mit Wirkungen auf Regenwürmer, gefolgt von Enchyträen (Kleinschwänzwürmern) und Spring- schwänzen (s. Tabelle 3). Die weitaus meisten Unter- suchungen wurden im Freiland durchgeführt und erfassten Wirkungen der Bodenverdichtung auf die Abundanz der Tiere.

Tabelle 4 gibt einen Überblick zu den mikrobiolo- gischen Datensätzen. Am häufigsten wurde die mikro- bielle Biomasse gefolgt von der C-Mineralisation als Endpunkt herangezogen, wobei beide Parameter je- weils mit sehr unterschiedlichen Methoden bestimmt wurden. Wirkungen von Verdichtungen auf die N-Mine- ralisation, die Denitrifikation und den metabolischen Quotienten (q CO₂) wurden nur in drei Feldexperimen- ten erfasst. In einzelnen Arbeiten wurden zum Teil viele zusätzliche Parameter gemessen. Freiland- und Labor- untersuchungen hielten sich die Waage.

Informationen zu den in den Versuchen abgedeck- ten Trockenrohdichten (ρ_r) gibt Tabelle 5. In den Kon- trollböden variierte ρ_r von 0,75 bis 1,47 g cm⁻³. Die ver- dichteten Varianten wiesen Trockenrohdichten zwi- schen 0,92 g cm⁻³ und 1,80 g cm⁻³ auf. Ähnliche Dichte- bereiche deckten die Böden der bodenzoologischen Untersuchungen ab. Die Medianwerte der Kontrollen und verdichteten Varianten lagen mit 1,3 g cm⁻³ (Kon- trollen) und 1,5 g cm⁻³ etwas höher. Die prozentualen Änderungen der Trockenrohdichten betragen mini- mal 0 % bzw. 0,94 % und maximal 51 % und 50 %.

5. Ergebnisse der Auswertungen mit Diskussion
Bodenfauna

Für die Auswertung der Daten wurden die Wirkungen von Verdichtung als „% Veränderung zur Kontrolle“



ausgedrückt. So können Effekte auf sehr unterschiedliche Parameter (Biomasse, Artenzahl, Ganglänge) gemeinsam betrachtet werden. Positive und negative Werte sind bei dieser Darstellung nicht direkt vergleichbar, da die positiven Werte beliebig groß werden können, während der maximale Unterschied bei den negativen Werten -100% ist, nämlich dann, wenn in der verdichteten Variante der Messwert 0 ist. Abbildung 1 zeigt, dass es für die Gesamtheit der erfassten Daten keinen deutlichen Zusammenhang zwischen Erhöhung der Trockenrohdichte und Veränderung des zoologischen Parameters gibt. Bei etwa 30 % der Datensätze handelt es sich um positive Messwerte, wovon wiederum ein Drittel aus zwei Studien zur Losungsproduktion durch Regenwürmer im Laborversuch stammt [3] [10]. Die Anzahl der Studien ist gering und die Aussage tiefe begrenzt, doch tiefgrabende Regenwurmartern fressen sich in verdichtetem Boden offenbar vermehrt durch den Boden hindurch anstatt ihn beiseite zu schieben und produzieren daher mehr Kothäufchen. Welche Auswirkungen diese Verhaltensänderung wiederum auf Bodeneigenschaften hat, war nicht Gegenstand der Untersuchungen.

Zunächst entspricht es nicht den Erwartungen, dass zwischen der Erhöhung der Dichte und den Veränderungen der zoologischen Parameter kein Zusammenhang erkennbar ist, da in vielen Studien Effekte gefunden werden, die teils statistisch signifikant sind. Ein erhebliches Problem ist die Vielfalt der Versuchsbedingungen, der verwendeten Böden sowie der untersuchten zoologischen und bodenphysikalischen Parameter.

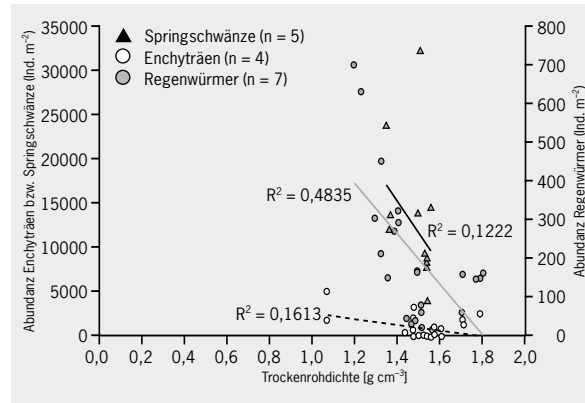


Abbildung 1 (links)
Beziehung zwischen den Veränderungen zoologischer Parameter und Trockenrohdichte. Untersuchungen zur Losungsproduktion von Regenwürmern hervorgehoben wegen hohen Anteils positiver Veränderung. n = Anzahl der Studien

Abbildung 2 (rechts)
Abundanz von drei Bodentiergruppen im Verhältnis zur Trockenrohdichte. Nur Daten aus den verdichteten Varianten der jeweiligen Studien. n = Anzahl der Studien

Eine Unterteilung der berücksichtigten Studien in Gruppen mit ähnlichen Rahmenbedingungen liefert zum Teil deutlichere Zusammenhänge. Abbildung 2 zeigt getrennt für drei Tiergruppen die Abundanz in Beziehung zur Dichte des Bodens. Mit zunehmender Dichte nimmt die Abundanz der Tiere tendenziell ab. Die Bestimmtheitsmaße sind eher niedrig, aber erheblich höher als bei Betrachtung aller Daten.

Ein Schwellenwert lässt sich nach Auswertung aller geeigneten Studien nicht abschätzen. Ursachen dafür sind:

1. Geringe Anzahl geeigneter Studien (22) und daher begrenzte Möglichkeit zur Gruppierung nach ähnlichen Bedingungen.
2. Sehr hohe Bandbreite der gemessenen bodenphysikalischen Parameter. Sowohl bei Kontrollvarianten als auch bei behandelten Varianten waren sehr geringe bis hohe Dichten vertreten. Eine Erhöhung der Dichte um 20% hat aber vermutlich für die Bodenfauna bei einer ursprünglichen Dichte von 1,1 andere Effekte als bei einer ursprünglichen Dichte von 1,5.
3. Messung unterschiedlicher biologischer Parameter, die möglicherweise verschieden auf Verdichtung des Bodens reagieren.
4. Unterschiedliche Art der Belastung und der Landnutzung. Bei Belastung im Freiland durch Viehtritt oder Befahrung treten durch Knetung des Bodens andere Veränderungen bodenphysikalischer Parameter auf als bei der Verdichtung von Bodensäulen im Labor.

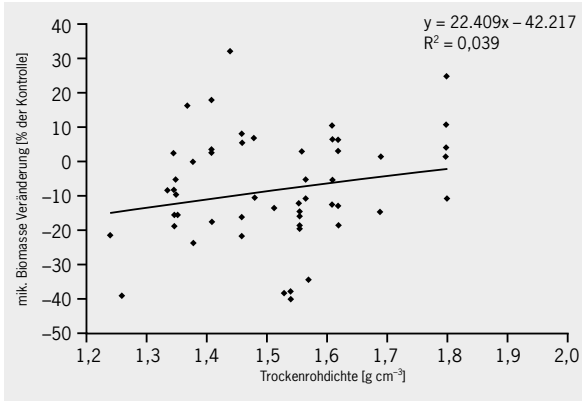


Abbildung 3
Veränderung der mikrobiellen Biomasse (in % des Ausgangswertes ohne Verdichtung) in Bezug zur Trockenrohdichte nach der Verdichtung in verschiedenen Felduntersuchungen

5. Unterschiedliche Bodenarten und Humusgehalte der untersuchten Böden. Diese Parameter stehen in Zusammenhang mit bodenphysikalischen Parametern, waren aber mit unterschiedlicher Genauigkeit oder gar nicht angegeben.

Die genannten Punkte tragen zu einer starken Heterogenität der in die Datenbank eingegangenen zoologischen Daten bei. Der am häufigsten gemessene bodenphysikalische Parameter war die Trockenrohdichte. Dass zwischen einer relativen oder absoluten Veränderung der Dichte und den zoologischen Parametern kein Zusammenhang erkennbar war, liegt jedoch möglicherweise nicht nur an der Heterogenität der Daten. Auffällig war, dass in vielen Studien in den behandelten Varianten Effekte auf die Bodenfauna gefunden wurden, oft auch dann, wenn die Belastung („Verdichtung“) keinen nennenswerten Effekt auf die Trockenrohdichte hatte. In mehreren Arbeiten wird daher ausdrücklich darauf hingewiesen, dass dieser Parameter offenbar keine geeignete bodenphysikalische Größe ist, um die Effekte von Belastung auf die Bodenfauna abzuschätzen. Andere Parameter, wie der Grobporenanteil oder die Porenkontinuität wären wahrscheinlich besser geeignet, werden aber nur höchst selten ermittelt.

Bodenmikroorganismen

Die Wirkung der Verdichtung wurde für den Vergleich der Ergebnisse der verschiedenen Publikationen wie bei den zoologischen Parametern relativ zum Ausgangswert (% Veränderung zur Kontrolle) angegeben. Damit ließen sich die Ergebnisse der verschiedenen Methoden zur Bestimmung der Parameter, die jeweils unterschiedliche absolute Werte aufweisen, miteinander verglei-

chen. Bei der mikrobiellen Biomasse wurden in den meisten Arbeiten entweder die Methode der substratinduzierten Respiration (SIR) oder die Fumigations-Extraktions-Methode (CFE) verwendet, für die C-Mineralisation die CO₂-Produktion meistens an Mischproben im Labor, z. T. auch als CO₂-Produktion im Feld. Grundsätzlich wurde zwischen Feld- und Laboruntersuchungen unterschieden. Kriterium für die Einteilung in die 2 Gruppen war, unter welchen Bedingungen die Verdichtung wirken konnte. Messungen des Bodenzustandes nach Verdichtung – z. B. mikrobielle Biomasse, Basalatmung etc. – wurden auch bei Feldversuchen im Labor vorgenommen.

Zwischen der Veränderung der mikrobiellen Biomasse durch die Verdichtung und dem Endpunkt der Verdichtung in Feldversuchen (angegeben als Trockenrohdichte) konnte kein deutlicher Zusammenhang gefunden werden (Abbildung 3). Die Regressionsgerade weist sogar eine leicht positive Steigung auf. Die Streuung der Veränderungen der mikrobiellen Biomasse in % des Ausgangszustandes vor der Verdichtung war enorm. Der Grund, warum bei den Feldversuchen mit steigender Verdichtung keine eindeutige negative Veränderung der mikrobiellen Biomasse gefunden werden konnte, dürfte in der großen Vielfalt der zusammengefassten Arbeiten liegen. Dies betrifft:

- ◆ Unterschied in den Eigenschaften der untersuchten Böden mit Tongehalten von 6 bis 48 %, Corg-Gehalten von 0,65 bis 4,6 % und pH-Werten zwischen 5,3 und 8,2
- ◆ Das Ausmaß von Verdichtungen von 0 bis 50 % des Ausgangszustandes der Trockenrohdichte bzw. von 0 bis 61 % des Grobporenvolumens
- ◆ Die Dauer der Verdichtungen von 3 Wochen bis 9 Jahren bzw. Beobachtung 3 Wochen bis 9 Jahre nach der Verdichtung
- ◆ Die klimatischen bzw. Bodenzustandsbedingungen waren einerseits sehr unterschiedlich und andererseits über den beobachteten Zeitraum sehr variabel.

Eine Reduktion auf hinsichtlich dieser Punkte vergleichbare Arbeiten (z. B. gleiche Bodeneigenschaften, ähnliche Dauer) war nicht möglich, da dann jeweils nur noch sehr wenige Arbeiten hätten zusammengefasst werden können

Demgegenüber zeigen die Ergebnisse der Laboruntersuchungen (Abbildung 4) ein wesentlich deutlicheres Bild. Zwar weisen sie ebenfalls eine große Variabilität auf, aber die Regression ergibt eine signifi-

Abbildung 4
Veränderung der mikrobiellen Biomasse (in % des Ausgangswertes ohne Verdichtung) in Bezug zur effektiven Lagerungsdichte nach der Verdichtung in verschiedenen Laboruntersuchungen

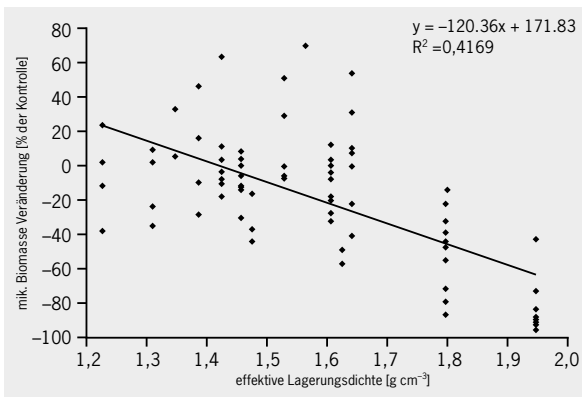
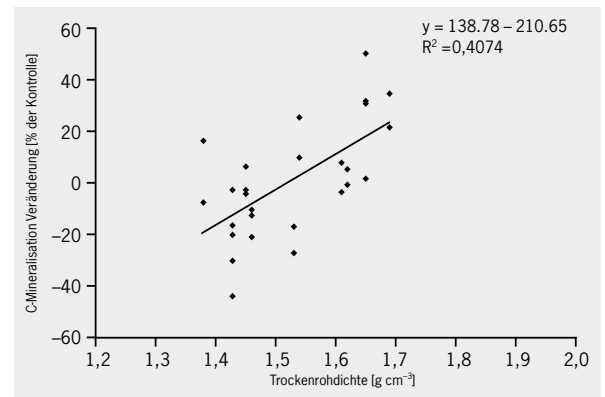


Abbildung 5 (rechts)
Veränderung der C-Mineralisation (in % des Ausgangswertes ohne Verdichtung) in Bezug zur Trockenrohdichte nach der Verdichtung in verschiedenen Felduntersuchungen



fikante negative Steigung. Das heißt, je höher die durch die Verdichtung erreichte Lagerungsdichte ist, desto negativer ist die Veränderung der Biomasse in den Proben am Ende des Laborversuches. Dies obwohl sowohl die Dauer der Wirkung der Verdichtung, wie auch das Ausmaß der Verdichtung (in die Gleichung geht nur der Endpunkt der Verdichtung ein) in den einzelnen Untersuchungen unterschiedlich war. Die Variabilität bezüglich Bodeneigenschaften und Ausmaß der Verdichtung (Erhöhung der Lagerungsdichte um 10 bis 45 %) ist ähnlich wie bei den Feldversuchen, hingegen ist sie bezüglich der Dauer der Einwirkung zwischen 20 und 180 Tagen deutlich geringer. Wichtig ist, dass die Versuchsbedingungen im Labor zwar zwischen den verschiedenen Untersuchungen variabel waren, aber innerhalb der einzelnen Versuche konstant gehalten wurde. Hinsichtlich der Diskussion um die Begründung von physikalischen Grenzwerten durch die Auswirkungen auf biologische Parameter ist die Feststellung wesentlich, dass die Auswirkungen von Verdichtungen auf die mikrobielle Biomasse sowohl positiv wie auch negativ sein können, aber bei einer Verdichtung auf eine effektive Lagerungsdichte von $1,7 \text{ g/cm}^3$ und höher nur noch negative Auswirkungen auftreten.

Die C-Mineralisation wurde in den Feldversuchen entweder als CO_2 -Fluss aus dem Boden oder als CO_2 -Produktion an strukturierten Proben (Zylinderproben) im Labor gemessen. Die Ergebnisse sind grundsätzlich ähnlich wie bei der mikrobiellen Biomasse. Im Feld bzw. an Proben aus Feldversuchen (Abbildung 5) konnte keine negative Beeinflussung, sondern eher eine Förderung der CO_2 -Produktion durch Verdichtung festgestellt werden. In den Laboruntersuchungen (Abbildung 6) wurden bei Verdichtungen auf höhere Lagerungsdichten dagegen vermehrt negative Veränderungen beobachtet. Auch bei diesem Parameter treten bei Verdichtungen auf effektive Lagerungsdichten von mehr als $1,7 \text{ g/cm}^3$ ausschließlich negative Auswirkungen auf.

6. Schlussfolgerungen

Ein wesentliches Ergebnis der Literaturlauswertung ist, dass bodenzoologische Untersuchungen selbst bei Fragestellungen mit Bezug zur Bodenphysik nur in ungenügendem Umfang bodenphysikalisch relevante Parameter erheben. Die Situation war bei den erfassten Arbeiten mit mikrobiologischen Untersuchungen etwas besser, aber lediglich die Arbeiten mit Laborexpe-

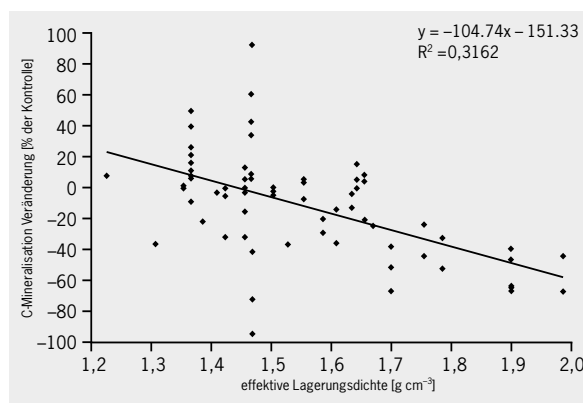


Abbildung 6
Veränderung der C-Mineralisation (in % des Ausgangswertes ohne Verdichtung) in Bezug zur effektiven Lagerungsdichte nach der Verdichtung in verschiedenen Laboruntersuchungen

rimenten geben meistens ausreichende Angaben zu den Begleitparametern wie Bodeneigenschaften, Ausmaß der Verdichtung (bzw. Bodendichte) und Inkubationsbedingungen an. Für einen Vergleich von verschiedenen Arbeiten ist es notwendig, dass entweder dieselben bodenphysikalischen Parameter (Trockenrohdichte, Porenvolumina, Bodenfeuchte) oder mindestens zusätzlich genaue Angaben zu den Bodeneigenschaften wie Körnung und C-Gehalt angegeben sind, so dass die physikalischen Parameter berechnet werden können. Das wird zudem oft erschwert, weil die Bodenart in verschiedenen Staaten nicht vergleichbar oder Grenzen für Korn- oder Porengrößen unterschiedlich sind.

Sowohl bei zoologischen wie auch bei den mikrobiologischen Parametern kommen bei geringen bis starken Verdichtungen positive und negative Veränderungen vor. Vor allem bei den mikrobiologischen Parametern spielen neben der tatsächlichen Verdichtung abhängig von den Bodeneigenschaften (Bodenart) die Bedingungen in Bezug auf den Luft- und Wasserhaushalt des Bodens eine wesentliche Rolle für das Auftreten einer schädlichen Veränderung. Auch wenn teilweise positive Veränderungen festgestellt wurden, traten bei den Feldversuchen praktisch gleich häufig auch negative Veränderungen auf, bei Laboruntersuchungen häufiger negative Veränderungen und dies vor allem bei Verdichtungen auf höhere Trockenrohdichten. Eine Bestätigung der vorgeschlagenen physikalischen Grenzwerte konnte nicht eindeutig erbracht werden, doch ist die Tatsache, dass bei Verdichtungen auf effektive Lagerungsdichten von über $1,7 \text{ g/cm}^3$ nur noch negative Veränderungen von Biomasse und C-Mi-

neralisation beobachtet wurden, ein deutliches Indiz, dass ein Schwellenwert in diesem Bereich auch im Hinblick auf eine Beeinträchtigung der biologischen Bodenfunktionen gerechtfertigt erscheint.

Auf Grund der Bedeutung dieses Themas im Hinblick auf den Bodenschutz und die Emission klimarelevanter Gase aus der Landwirtschaft ist eine vertiefte Forschung zu den Zusammenhängen zwischen physikalischen Beeinträchtigungen und den Folgen für die Bodenorganismen notwendig. Damit die Ergebnisse vergleichbar sind und daraus Konsequenzen für allfällige Schwellenwerte gezogen werden können, müssten mindestens folgende Bodenangaben vorhanden sein: Bodentyp (WRD), Trockenrohdichte, Bodenfeuchtigkeit als Wasserpotenzial, Ton-, Schluff-, Sand- und Corg-Gehalt, pH-Wert. Ebenfalls sehr wichtig, aber bereits über Pedotransferfunktionen abschätzbar sind Porenvolumina und volumetrischer Wassergehalt.

Danksagung

Die hier vorgestellten Ergebnisse wurden vom BVB FA „Biologische Bewertung von Böden“ erarbeitet. Daran beteiligt waren neben den Autoren G. Broll, H. Brauckmann, H. Fründ, Th. Gärtig, U. Graefe, H. Höper, H. Oberholzer, K. Rahtkens, A. Ruf, S. Schrader. Ihnen möchten wir ebenso danken wie der Bundesanstalt für Materialforschung sowie dem Umweltbundesamt für die finanzielle Unterstützung (FKZ 36013009).

Literatur

- [1] **BBodSchG (Bundes-Bodenschutzgesetz) (1998):** Gesetz zum Schutz vor schädlichen Bodenveränderungen und zur Sanierung von Altlasten. BGBl I, 1998, 504, vom 17.3.1998.
- [2] **BBodSchV (Bundes-Bodenschutzverordnung) (1999):** Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung. Verordnung zur Durchführung des Bundes-Bodenschutzgesetzes. BGBl I, 36, S. 1554–1582 vom 16.6.1999.
- [3] **Buck, C.; Langmaack, M.; Schrader, S. (2000):** Influence of mulch and soil compaction on earthworm cast properties. *Applied Soil Ecology*, 14: 223–229.
- [4] **Doran, D. W., Mielke, L. N., Stamatiadis, S. (1988):** Microbial activity and N cycling as regulated by soil water-filled pore space. *ISTRO Proceedings* 1, 49–54.
- [5] **Heisler, C. (1993):** Einfluß von mechanischen Bodenbelastungen (Verdichtung) auf Raubmilben und Collembolen in landwirtschaftlich intensiv genutzten Flächen. *Inf. Natursch. Landschaftspfl.*, 6: 209–219.
- [6] **Jégou, D.; Brunotte, J.; Rogasik, H.; Capowicz, Y.; Diestel, H.; Schrader, S.; Cluzeau, D. (2002):** Impact of soil compaction on earthworm burrow systems using X-ray computed tomography. Preliminary study. *European Journal of Soil Biology*, 38: 329–336.
- [7] **Jensen, L. S.; Mcqueen, D. J., and Shepherd, T. G. (1996a):** Effects of Soil Compaction on N-Mineralization and Microbial-C and -N .1. *Field Measurements. Soil & Tillage Research*, 38 (3–4):175–188.
- [8] **Jensen, L. S.; Mcqueen, D. J.; Ross, D. J., and Tate, K. R. (1996b):** Effects of Soil Compaction on N-Mineralization and Microbial-C and -N.2. *Laboratory Simulation. Soil & Tillage Research*, 38(3–4): 189–202.
- [9] **Kracht, M.; Schrader, S. (1997):** Collembola und Acari in verdichtetem Ackerboden unter verschiedenen Bodenbearbeitungssystemen. *Braunsch. naturkundl. Schr.* 5(2): 425–440.
- [10] **Kretzschmar, A. (1991):** Burrowing ability of the earthworm *Aporrectodea longa* limited by soil compaction and water potential. *Biol. Fertil. Soils*, 11: 48–51.
- [11] **Langmaack, M.; Schrader, S.; Rapp-Bernhardt, U.; Kotzke, K. (1999):** Quantitative analysis of earthworm burrow systems with respect to biological soil-structure regeneration after soil compaction. *Biol. Fertil. Soils*, 28: 219–229.
- [12] **Lebert, M.; Brunotte, J.; Sommer, C. (2004):** Ableitung von Kriterien zur Charakterisierung einer schädlichen Bodenverdichtung entstanden durch nutzungsbedingte Verdichtung von Böden/Regelungen zur Gefahrenabwehr. UBATEXT 46/04. Umweltbundesamt, Berlin: 122 S.
- [13] **Nevens, F., Reheul, D. (2003):** The Consequences of Wheel-Induced Soil Compaction and Subsoiling for Silage Maize on a Sandy Loam Soil in Belgium. *Soil & Tillage Research*, 70(2): 175–184.
- [14] **Röhrig, R.; Langmaack, M.; Schrader, S.; Larink, O. (1998):** Tillage systems and soil compaction – their impact on abundance and vertical distribution of Enchytraeidae. *Soil & Tillage Research*, 46: 117–127.
- [15] **Ruser, R., Flessa, H., Russow, R., Schmidt, G., Buegger, F., Munch, J. C. (2006):** Emission of N₂O, N₂ and CO₂ from soil fertilized with nitrate: Effect of compaction, soil moisture and rewetting. *Soil Biology & Biochemistry*, 38(2): 263–274.
- [16] **Schäffer, J. (2005):** Befahrung von Waldböden – Strategien zur Schadensminimierung. *Bodenschutz*, 3: 76–82.

Anschriften der Verfasser

Prof. Dr. Dr. Berndt-Michael Wilke

Technische Universität Berlin
Institut für Ökologie
FG Abfallbelastung der Landschaft
Franklinstr. 29, 10587 Berlin
E-Mail: bmwilke@tu-berlin.de

Dr. Hans-Rudolf Oberholzer

Forschungsanstalt Agroscope
Reckenholz-Tänikon ART
Reckenholzstrasse 191, CH-8046 Zürich
E-Mail: hansrudolf.oberholzer@art.admin.ch

Dr. Anneke Beylich

IFAB Institut für Angewandte Bodenbiologie GmbH
Sodenkamp 59, 62, 22337 Hamburg
E-Mail: anneke.beylich@ifab-hamburg.de