

Wie gut ist mein Boden? Eignet sich die Lebendverbauung von Böden als Sammelindikator für die Bodenqualität?

Tatjana Schneckenburger^{1,2}, Andrea Beste³

Keywords: Bodenstruktur, Lebendverbauung, Bodenqualität, Bodenmanagement

Abstract

Organic farming can contribute to soil improvement through cultivation measures. However, there is no comprehensive, simple and inexpensive tool for distinguishing soils in good from those in poor condition. In this study, we examine whether biogenically formed soil structure, measured by qualitative structural analysis, is suitable as a collective indicator of the physical, chemical and biological condition of a soil, and thereby its quality. Laboratory and field data from a site in Weinheim were compared with data from qualitative structural analysis. Our first statistical approach indicates that biogenic soil structure may serve as collective indicator of soil quality. Data from further sites needs to be included to derive a universally applicable model. A collective indicator of soil quality can significantly simplify quality assessment of soils.

Einleitung und Zielsetzung

Ein guter landwirtschaftlicher Boden ist als Boden definiert, der seine Funktionen als Pflanzenstandort gut erfüllt. Dazu zählen eine bedarfsgerechte Nährstofffreisetzung und ein ausgeglichener Wasserhaushalt. Bodenorganismen spielen eine wesentliche Rolle für diese und weitere Ökosystemleistungen des Bodens (Wagg et al., 2014), durch den Aufbau von Aggregaten (Lehmann et al., 2017) und einer Bodenstruktur. Agrarökologische Maßnahmen im Ökolandbau leisten daher über die Förderung von Biodiversität und Bodenleben einen wichtigen Beitrag zur Bodenverbesserung. Böden bieten wiederum Lebensraum für 59 % der globalen Biodiversität (Anthony et al., 2023). Die Ertragslücke zwischen Öko- und konventionellem Landbau ist oft Gegenstand von Kritik am Ökolandbau. Die Ökosystemleistungen müssen daher dringend in Berechnungen zur Wirtschaftlichkeit einbezogen werden. Bodenstruktur und Produktivität zeigen im Ökolandbau, ohne direkte Pflanzenernährung über leicht-lösliche Stickstoffdünger, einen deutlichen Zusammenhang (Diez et al., 1991).

In der EU (EU-Bodenüberwachungsrichtlinie, 2024) werden derzeit im Labor messbare Deskriptoren aus Bodenphysik, Bodenchemie und Bodenbiologie zur Beurteilung der Bodenqualität festgelegt. Auch in wissenschaftlichen Studien wurden Bodenqualitätsparameter benannt, z.B. organische Bodensubstanz (C_{org}), pH-Wert, Aggregatstabilität oder mikrobielle Respiration, (Bünemann et al., 2018, Bagnall et al., 2023). In der Praxis findet die Spatenprobe zur Beurteilung der Bodenqualität Anwendung. Diese wurde als "Qualitative Strukturanalyse" weiterentwickelt und liefert

¹ Technische Hochschule Bingen, Berlinstraße 109, 55411, Bingen, Deutschland, t.schneckenburger@th-bingen.de; www.th-bingen.de.

² Büro für Bodenökologie und Naturschutz, Pfaffenbergstraße 85, 67663 Kaiserslautern, Deutschland, schneckenburger@boden-und-natur.de; www.boden-und-natur.de.

³ Büro für Bodenschutz und Ökologische Agrarkultur, Kurfürstenstraße 23, 55118 Mainz, Deutschland, gesunde-erde@posteo.de, <https://www.gesunde-erde.net>.

eine differenzierte Gefügenote (Beste, 2002). Diese Methode bietet ein einfach erlernbares und preiswertes Instrument, die Bodenqualität flächendeckend zu erheben (Ball & Douglas, 2003). Ein Zusammenhang zwischen der damit erfassten Lebendverbauung von Böden und der Bodenqualität wurde nachgewiesen (Bronick und Lal, 2005, Beste, 2002, Diez 1991).

Ziel dieser Untersuchung war es, Wissenschaft und Praxis zu verbinden und die Hypothesen zu überprüfen, dass (i) im Labor gemessene Bodenqualitätsparameter (*BQP*) mit den Gefügeindikatoren (*GI*) korrelieren und so das Maß der Praktiker für die Bodenqualität repräsentieren können, und (ii), diese *GI* auch aus wissenschaftlicher Sicht als Sammelindikatoren für die Bodenqualität dienen können, die perspektivisch für eine flächendeckende, ökonomisch vertretbare Bodenerhebung geeignet sind.

Methoden

Untersuchungsflächen: Auf drei je ca. ein Hektar großen Flächen auf der Gemarkung Weinheim wurden Bodenqualitätsparameter (*BQP*) auf schluffigen Lehmen und tonigen Schluffen (Lu, Ut3) mit guter Kalkversorgung (pH 6,3 – 7,6) untersucht. Eine Fläche war konventionell nach „guter fachlicher Praxis“ (*F1*) und zwei konventionell mit viergliedriger Fruchtfolge und Zwischenfrucht (*F2*), davon eine mit zusätzlichen regenerativen Maßnahmen (*F3*). Bodenproben wurden jährlich im März von 2022 bis 2025 an vier Punkten je Fläche entnommen.

Bodenqualitätsparameter: Die Bodenqualität wurde in Oberkrume (*OK*, 0-15 cm), Unterkrume (*UK*, 15-30 cm) und Unterboden (30-40 cm) mittels qualitativer Strukturanalyse und Aggregatstabilitätstests mit feldfrischen Proben erfasst (Beste, 2002). Daraus wurde der Gefügeindex (Junge et al., 2019) berechnet. Als bodenphysikalische Indikatoren wurden Trockenrohdichten und Wassergehalte gravimetrisch bestimmt, als bodenchemische Indikatoren pH-Werte (0,01 M CaCl_2 -Lsg), Nährstoffe (N+P: CAL, Mg: CaCl_2), die effektive Kationenaustauschkapazität und C_{org} (Elementaranalyse) und als bodenbiologische Parameter wurden Anzahl und Masse der Regenwürmer durch Auszählung in einem Bodenblock (30x30x30 cm) (Walter, 2025) sowie biogene Spuren (z.B. Regenwurmröhren) an der Oberfläche bestimmt.

Statistische Methoden: In die statistische Auswertung flossen Daten zu *OK* und *UK* ein. Die Auswahl der Parameter erfolgte anhand verfügbarer Daten und möglichst vollständiger Datensätze. Korrelationsanalysen nach Pearson und Spearman und eine Hauptkomponentenanalyse (Paket FactoMineR) wurden mit Bodenqualitätsparametern und Gefüge Indikatoren (*GI*) in R 4.5.1 (R Core Team, 2025) durchgeführt.

Ergebnisse und Diskussion

Die Gefügenoten reichten im Oberboden (0-30 cm) von 1-4, mit 1 als schlechtesten und 5 als besten Gefügenote der Skala. Der Gefügeindex rangierte zwischen 14 und 72 %. Die Wertebereiche der Bodenqualitätsparameter (*BQP*) sind in Tab. 1 dargestellt. Die Gefügenote korrelierte mit dem Gehalt an organischem Kohlenstoff (C_{org}), dem C/N-Verhältnis und dem Wassergehalt, in der Unterkrume deutlicher als in der Oberkrume. Der Gefügeindex korrelierte mit dem pH-Wert, C/N-Verhältnis, pflanzenverfügbarem Magnesium, C_{org} , Wassergehalt und der Zahl an Regenwurmröhren (Tab. 2). Ein negativer Zusammenhang von Gefügeindikatoren (*GI*) mit pH und C_{org} zeigt, dass im untersuchten pH-Bereich niedrigere pH-Werte keinen negativen Einfluss auf die Bodenstruktur hatten und Unterkrumen mit geringeren C_{org} -Gehalten (Flächen *F2*, *F3* unter reduzierter Bodenbearbeitung) dennoch eine gute Bodenstruktur aufwiesen.

Tab. 1: Wertebereiche der Bodenqualitätsparameter, Weinheim.

Bodenchemische Qualitätsparameter Oberboden (0-30 cm)					
	C_{org} [%]	pH ($CaCl_2$)	KAK_{eff} [mmol $_c$ kg $^{-1}$]	C/N-Verh. [-]	Mg^{2+} [mg kg $^{-1}$]
Min.	1,06	6,3	148	8,5	12
Max.	1,62	7,0	161	10,0	16
B.-phys. Param. (0-30 cm)			B.-biologische Parameter (0-30 cm)		
	Wasser- gehalt [% m/m]	Trocken- rohdichte [g cm $^{-3}$]	Regenw. - masse [g m $^{-2}$]	Anzahl Regenw.- röhren 1 [m $^{-2}$]	Mikrob. Biomasse 2 [mg kg $^{-1}$]
Min.	17,0	0,96	12	38	394
Max.	30,4	1,80	348	294	510

Anzahl Erhebungen n je Parameter und Krumentiefe: n = 36; 1n = 24; 2n = 12.

Der positive Einfluss enger C/N-Verhältnisse auf die *GI* (Tab. 2) zeigt, dass verfügbarer Stickstoff die Bodenaggregation fördert, vermutlich gekoppelt mit bodenbiologischen Prozessen. Steigende Wassergehalte beeinflussten die *GI* negativ, was damit zusammenhängt, dass die Bodenfeuchten beim Probenahmezeitpunkt (März) über dem optimalen Wassergehalt für die Strukturbildung und -analyse (Beste, 2002) lagen. Die *GI* korrelierten mit mehreren *BQP*, wiesen jedoch mit keinem eine ausgeprägte Kollinearität auf. Die Ergebnisse zeigen, dass die *GI* nicht primär mit einzelnen, sondern mit mehreren voneinander unabhängigen *BQP* in Zusammenhang stehen und somit die Voraussetzung für einen Misch- bzw. Sammelindikator erfüllen.

Tab. 2: Pearson-Korrelationskoeffizienten *r* und Signifikanzen *p* der Pearson und Spearman-Korrelationen zwischen *BQP* und *GI* (Gefügenote & Gefügeindex).

		Chemische Bodenqualitätsparameter (<i>BQP</i>)				
Tiefe	<i>P.-Koeff. r</i>	C_{org}	pH -Wert	KAK_{eff}	C/N-Vrh.	Mg^{2+}
0-15 cm	Gefügenote	0,081	-0,178	-0,230	-0,440**	0,197
	Gefügeindex	0,281	-0,345'	-0,380	-0,500**	0,496**
15-30 cm	Gefügenote	-0,737***	-0,128	-0,071	-0,611***	-0,251
	Gefügeindex	-0,682***	0,039	-0,143	-0,670***	-0,404
		Physikal. <i>BQP</i>		Biologische <i>BQP</i>		
Tiefe	<i>Pearson - Koeffizient r</i>	Wasser- gehalt	Trocken- rohdichte	Regenw. -masse	Regenw.- röhren 1	Mikrob. Biom. 2
0-15 cm	Gefügenote	-0,145	-0,180	-0,117	0,531	-0,145
	Gefügeindex	-0,098	-0,300	-0,262	0,655*	0,249
15-30 cm	Gefügenote	-0,616***	-0,003	0,074	0,409	-0,147
	Gefügeindex	-0,590***	-0,058	0,208	0,488	0,489

Anzahl Erhebungen n je Parameter und Krumentiefe: n = 36; 1n = 24; 2n = 12.

*** Pearson und Spearman Korrelation hoch signifikant $p < 0,01$

** Pearson und Spearman Korrelation signifikant $p < 0,05$

* Pearson-Korrelation signifikant $p < 0,05$; ' Spearman-Korrelation signifikant $p < 0,05$

Eine ergänzende Hauptkomponentenanalyse ergab mehrere Kollinearitäten innerhalb, jedoch nur wenige zwischen bodenphysikalischen, -chemischen und -biologischen *BQP*: Während die *GI* überwiegend auf die zweite Hauptkomponente luden, verteilten

sich die *BQP* auf die Hauptkomponenten eins bis vier. Die fehlende Kollinearität zwischen *GI* und *BQP* bildet damit die Grundlage für ein multiples Regressionsmodell, das die *GI* mit mehreren unabhängigen *BQP* oder deren Hauptkomponenten verknüpft.

Schlussfolgerungen

Diese Studie umfasste eine Korrelationsanalyse als ersten Schritt, um die Feldbestimmung der Bodenqualität mittels Strukturanalyse mit der Bestimmung von Bodenqualitätsparametern im Labor in Beziehung zu setzen. Die Analyse zeigte, dass die Messung der Lebendverbauung über Gefügeindikatoren das Potential hat, Bodenqualitätsparameter abzubilden. Ein Modell unter Einbeziehung weiterer landwirtschaftlicher Standorte mit unterschiedlichen Bodenarten und Anbaumethoden (insbesondere Ökolandbau) wird als zweiter Schritt Gegenstand einer Folgestudie sein.

Danksagung

Wir danken der Stadt Weinheim, Stabsstelle Umwelt- und Klimaschutz, für die Förderung des Projekts "Bodenverbesserung und Klimaschutz", Ingrid Hagenbruch (Breitwiesen e.V.), Stefan Müller (Bewirtschafter Weinheim), Johanna Seliger und Alina Nitschke (Studierende der RPTU) für die Unterstützung bei der Probennahme.

Literatur

- Anthony M, Bender F & van der Heijden M G A (2023) Enumerating soil biodiversity. PNAS 120 (33) e2304663120; <https://doi.org/10.1073/pnas.2304663120>
- Bagnall D K, Rieke E L, Morgan C L S et al. (2023) A minimum suite of soil health indicators for North American agriculture. Soil Security 10, 100084, <https://doi.org/10.1016/j.soisec.2023.100084>
- Ball B C & Douglas J T (2003) A simple procedure for assessing soil structural, rooting and surface conditions. Soil Use and Management 19, 50-56. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2003.tb00279.x>
- Beste A (2002) Weiterentwicklung und Erprobung der Spatendiagnose als Feldmethode zur Bestimmung ökologisch wichtiger Gefügeeigenschaften landwirtschaftlich genutzter Böden. Dissertation, Fachbereich Agrarwissenschaften, Justus-Liebig-Universität Gießen
- Bronick C J, Lal R (2005) Soil structure and management: a review. Geoderma 124(1-2): 3-22. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.03.005>
- Bünemann E K, Bongiorno G, Bai Z. et al. (2018) Soil quality – A critical review. Soil Biology and Biochemistry 120,105-125, <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.01.030>.
- Diez T H (1991): Beurteilung des Bodengefüges im Feld: Möglichkeiten, Grenzen und ackerbauliche Folgerungen. In: Bodennutzung und Bodenfruchtbarkeit, S. 96-103, Verlag Paul Parey, Hamburg und Berlin.
- EU-Bodenüberwachungsrichtlinie (2024) Bodenüberwachung und -resilienz. P9TA(2024)0204. ELI: <http://data.europa.eu/eli/C/2025/1312/oj>
- Junge S M, Pfister J, Wedemeyer R & Finckh M R (2019) Regenerative Landwirtschaft – Bewertung des Systems durch die Erweiterte Spatendiagnose am Beispiel Kartoffel. 15. Wissenschaftstagung Ökologischer Landbau. Beitrag archiviert unter <http://orgprints.org>
- Lehmann A, Zheng W & Rillig M C. Soil biota contributions to soil aggregation (2017) Nat Ecol Evol. 1(12):1828-1835. doi: 10.1038/s41559-017-0344-y
- R Core Team (2025) R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>
- Wagg C, Bender S F, Widmer F & van der Heijden M G (2014) Soil biodiversity and soil community composition determine ecosystem multifunctionality. Proc Natl Acad Sci USA. 8;111(14):5266-70. doi: 10.1073/pnas.1320054111
- Walter R (2025) Schnellansprache zur Regenwurmhäufigkeit für Äcker. Posterpräsentation (Nr. 203), Jahrestagung der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft 2025.