

Bioindikation mit mikroskopisch kleinen Bodentieren

E. Aescht und W. Foissner, Salzburg/A

Zusammenfassung

Der Zustand eines Bodens läßt sich anhand seiner Mikro-, Meso- und Makrofauna charakterisieren. Für eine sachgerechte Beurteilung der Bodengüte sollte zumindest je ein Vertreter dieser Großgruppen untersucht werden (z. B. Schalenamöben, Milben, Regenwürmer). Unser Beitrag faßt diesbezügliche Erfahrungen mit den mikroskopisch kleinen Bodentieren zusammen. Folgende Beispiele aus der Praxis werden besprochen: Pestizide, organische und mineralische Dünger, Bodenverdichtung, ökologischer und konventioneller Landbau, Rekolonisation. Ein quantitatives Maß für die Beeinflussung eines Bodens durch anthropogene Aktivitäten ist der "Gewichtete Zönose-Index".

1. Einleitung

Die Bodenlebewesen bauen abgestorbene Pflanzen und Tiere ab. Dadurch werden die Nährstoffe verfügbar und der Stoffkreislauf geschlossen. Dieses "Recycling" im Boden ist eine der Grundlagen für das Leben auf der Erde, da ohne Zersetzung bald alle Nährelemente in toten Organismen gebunden wären. Es ist daher unzureichend, die Qualität eines Bodens nur nach chemischen und physikalischen Eigenschaften (z. B. Nährstoff-, Humus- und Tongehalt) zu beurteilen /2, 3, 6, 10, 13, 21, 26, 27/.

90% der Abbauarbeit besorgt die Mikroflora (Bakterien und Pilze), nur 10% entfallen auf die Bodentiere (Fig. 1). Dennoch sind sie wichtig, und zwar als Regulatoren des Abbaus. Freilandversuche, bei denen bestimmte Tiergruppen ausgeschaltet wurden, ergaben, daß ein mengenmäßiger Abbaurückstand von 11-13% und eine zeitliche Verzögerung von

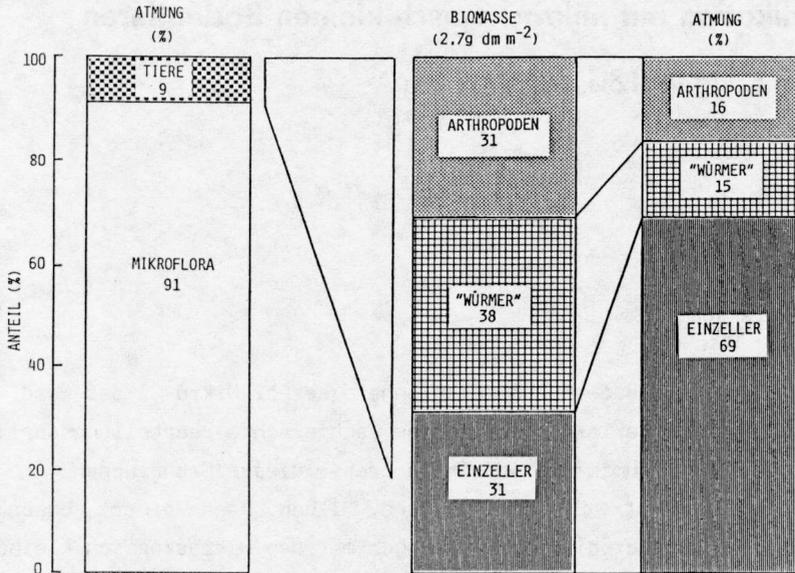


Fig. 1. Biomasse und Atmung der Bodenorganismen. Die Graphik zeigt die Mittelwerte von 14 Ökosystemstudien von verschiedenen Standorten der Welt (aus Foissner /10/). Arthropoden (Gliederfüßer): Käfer, Zweiflügler usw.; "Würmer": Fadenwürmer, Rädertiere, Enchytraeiden, Regenwürmer; Einzeller (Protozoen): Nacktamöben, Schalenamöben, Geißeltiere, Wimpertiere. dm = Bodentrockenmasse.

2-8 Monaten eintritt, wenn größere Tiere (>2 mm; Makrofauna) fehlen /4/. Sind überdies kleinere Tiere (0,2-2 mm; Mesofauna) ausgeschaltet, so wird der Abbau wesentlich stärker verzögert, nämlich 33-39% bzw. 8-18 Monate. Die Bakterien und Pilze erbringen zwar mit und ohne Bodentiere die gleiche physiologische Leistung, die Bodentiere beschleunigen jedoch den mikrobiellen Abbau um bis zu 18 Monate und erhöhen die Freisetzung von Nährstoffen um bis zu 50% /4/. Die Bodentiere kontrollieren demnach sehr effektiv die Abbauleistungen der Mikroflora und damit die Bereitstellung von Nährstoffen für die Pflanzen.

Einzeller, "Würmer" und Arthropoden stellen in der Regel je ein Drittel der tierischen Biomasse (standing crop) im Boden (Fig. 1). Ein Maß für die Stoffwechselaktivität und somit für den Stoffumsatz der jeweiligen Organismen ist die Atmung (Respiration). Die Protozoen

veratmen im Durchschnitt etwa 70%, also viel mehr als es ihrem Anteil an der Biomasse entspricht (Fig. 1). Dies deswegen, weil zur Deckung des Energiebedarfs umso mehr Nahrung aufgenommen werden muß, je kleiner ein Organismus ist. Hinsichtlich der Produktion, d. h. der in einer bestimmten Zeiteinheit neu gebildeten Biomasse, ist kaum bekannt, daß allein die Einzeller so viel produzieren wie die Regenwürmer, nämlich zwischen 30 und 250 g Frischmasse pro m^2 und Jahr /11/. Demnach entspricht der Anteil der Protozoen am Energieumsatz etwa jenem der "Würmer". In den extremen Regionen der Erde, wie den Gebirgen und den Polargebieten, werden weit über 50% des tierischen Energieumsatzes von den Protozoen geleistet, während es in regenwurmreichen Böden der gemäßigten Zonen wohl eher um 10-30% sind /10, 11/.

2. Bodenkleintiere als Bioindikatoren

2. 1 Möglichkeiten und Grenzen

Bioindikation bedeutet, daß Lebewesen abiotische und/oder biotische Umweltfaktoren anzeigen. Bekannte Beispiele dafür sind Stickstoffzeigerpflanzen und Flechten als Indikatoren für Luftverunreinigungen. In diesen Fällen ist es sogar möglich, die Reaktion auf jeweils einen einzigen Faktor, nämlich den N- bzw. SO_2 -Gehalt zurückzuführen. Da alle Lebewesen bestimmte Ansprüche an ihre Umwelt stellen und somit "Zeiger" für diese spezifische Situation sind, kann prinzipiell jede Organismenart als Bioindikator eingesetzt werden. Welche Arten oder Organismengruppen sich besonders eignen, hängt von der Fragestellung und dem Ökosystemtyp ab. Im allgemeinen sollte je eine Gruppe aus der Mikro-, Meso- und Makrofauna untersucht werden. Wir haben uns auf die mikroskopisch kleinen Tiere, besonders die Protozoen, spezialisiert und zwar aus folgenden Gründen (Fig. 2-5):

- * Protozoen sind wegen ihrem hohen Anteil am Energieumsatz eine wichtige Komponente im Ökosystem Boden (sh. oben). Veränderungen ihrer Zahl und Gemeinschaftsstruktur können daher auf Geschwindigkeit und Art der Bodenbildung nicht ohne Einfluß bleiben.

- * Protozoen reagieren schneller als alle anderen Eukaryoten auf

Umwelteinflüsse, weil sie eine "dünne Haut" und relativ kurze Generationszeiten haben; sie eignen sich deshalb besonders für eine Kurzzeitindikation. Dies ist aus Fließgewässern, in denen Protozoen seit langem als Bioindikatoren eingesetzt werden, gut bekannt /28/.

- * Protozoen sind ortstreu und viele (aber nicht alle!) Arten sind Kosmopoliten, was unter anderem einen leichteren Vergleich von Ergebnissen ermöglicht. Da Verlagerungen praktisch nur in der Vertikalen stattfinden, entfällt das bei anderen Tiergruppen, besonders beim Epigaion (= die auf der Bodenoberfläche lebenden Tiere), oft schwierig zu bewältigende Problem der horizontalen Migration.
- * Protozoen sind auch bzw. gerade dort reichlich vorhanden, wo viele andere Tiergruppen aufgrund extremer Lebensbedingungen ganz oder teilweise ausfallen, z. B. oberhalb der Waldgrenze und in den Polargebieten.
- * Die Struktur des eukaryotischen Genoms (= echter Zellkern) der Protozoen ähnelt dem der Metazoen. Im Gegensatz zu den Prokaryoten (Bakterien und Blaualgen ohne echten Zellkern) können die Ergebnisse daher eher verallgemeinert und auf höhere Organismen übertragen werden. Dies zeigen auch neuere Untersuchungen zum Ersatz von Tierversuchen /z. B. 16, 20/.

Es gibt jedoch Schwierigkeiten, die eine allgemeinere Verwendung der kleinen wie der größeren Bodentiere als Bioindikatoren behindern:

- * Ihre ungeheure Artenvielfalt - in einem Quadratmeter Waldboden gibt es z. B. über 1000 Tierarten /25/. Für ihre Bestimmung braucht man Spezialisten, die leider an den Universitäten kaum mehr ausgebildet werden. Jede dieser Arten hat spezifische Lebensansprüche, die selbst bei dominanten Arten oft nur in groben Umrissen bekannt sind.
- * Ihre mengenmäßige Erfassung ist ziemlich zeitaufwendig. Bei den Kleintieren ist dabei von Vorteil, daß man keine komplizierten

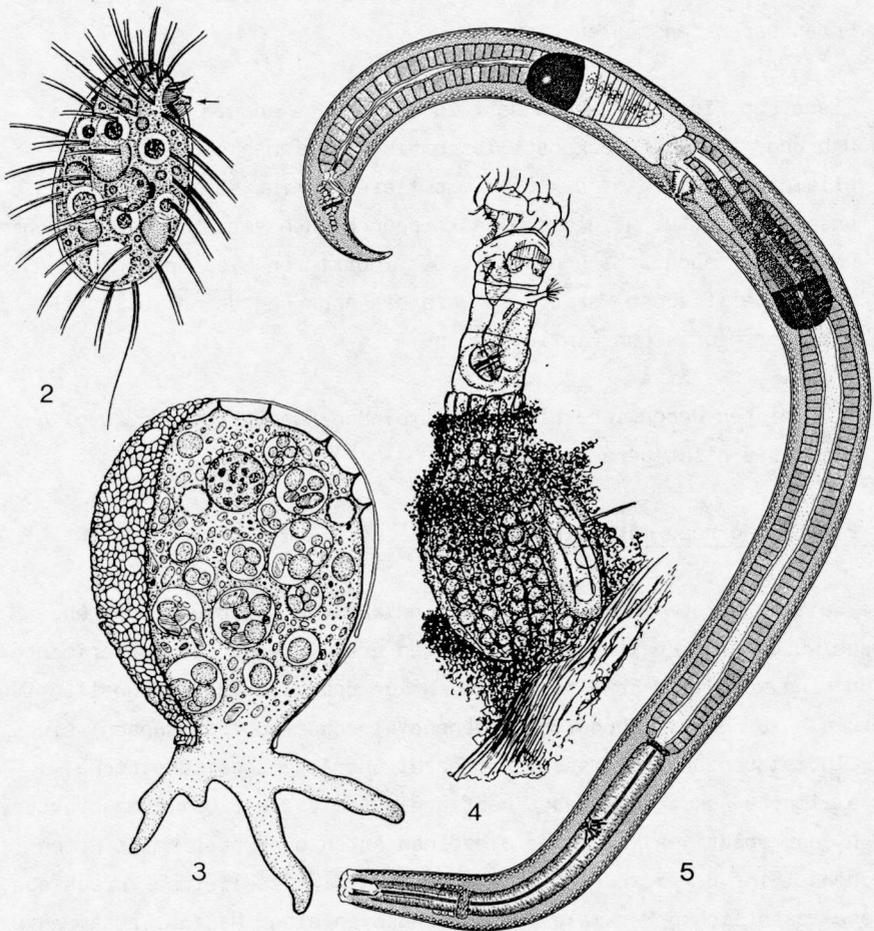


Fig. 2-5. Typische Kleintiere des Bodens (nach mehreren Autoren).

2: Die 0,02 bis 0,3 mm großen Wimpertiere (Ciliaten) besitzen, wie aus dem Namen hervorgeht, ein mehr oder weniger vollständiges Wimpernkleid, das sie zur Fortbewegung und zum Nahrungserwerb benutzen. Die abgebildete Art ernährt sich ausschließlich von Bodenpilzen, die sie mit Hilfe einer winzigen, rohrartigen Struktur (Pfeil) "anbohrt" und aus-saugt. 3: Die 0,02 bis 0,2 mm großen Schalenamöben (Testaceen) schützen ihren formveränderlichen Körper durch zierliche Gehäuse; durch die Schalenöffnung treten Scheinfüßchen (Pseudopodien) aus, mit denen Bakterien, Pilze und Humusteilchen aufgenommen werden. 4: Die 0,04 bis 1,5 mm langen Rädertiere (Rotatorien) besitzen ein sogenanntes Räderorgan (Name!) zum Herbeistrudeln der Nahrung, die vor allem aus Bakterien besteht. 5: Die 0,1 bis 2 mm langen Nematoden werden wegen ihrer Gestalt zurecht "Fadenwürmer" genannt; sie haben ein breites ökologisches Spektrum und sind Detritusfresser, Räuber und Sauger an Pflanzenwurzeln.

Extraktionsmethoden braucht, sondern sie direkt in der wäßrigen Bodensuspension zählen kann.

- * Tiere benötigen - im Gegensatz zu Pflanzen - andere Lebewesen als Nahrung; die Faktorenkonstellation ist bei ihnen also noch komplizierter. Die Bioindikation mit Tieren bleibt somit meist unspezifisch, d. h. gleiche Reaktionen können verschiedene Ursachen haben (sh. auch 3. 1 und 3. 2). Sie indizieren also selten nur einen spezifischen Faktor, sondern die Änderung der abiotischen und/oder biotischen Einflußgrößen.
- * Die meisten Bodentiere bleiben dem bloßen Auge verborgen, das macht sie nicht gerade attraktiv.

2. 2 Alte und neue methodische Ansätze

Die weitaus meisten Hinweise zur bioindikativen Bedeutung von Lebewesen wurden aus Freilanduntersuchungen erschlossen. Laborexperimente sind eine wertvolle Erweiterung. Wichtige quantitative und qualitative Merkmale zur Beschreibung von Lebensgemeinschaften (Biozöosen) sind die Individuenzahl, Biomasse, Artenzahl und Artenzusammensetzung. Detaillierte Aussagen erlaubt häufig die Analyse der Dominanzstruktur, d. h. der relativen Menge der einzelnen Arten oder bestimmter Artengruppen (Fig. 8) /z. B. 1, 17, 22, 31/. Es gibt zahlreiche Vorschläge, diese wesentlichen Merkmale der Biozönose in einer Maßzahl zusammenzufassen; am bekanntesten ist wohl die Diversität, bei der die Artenzahl, die Individuenzahl und die Dominanzstruktur verrechnet werden. Die Meinungen über die Aussagekraft solcher Indizes gehen weit auseinander /z. B. 2, 3, 19, 30/. In der Tat hat sich die Diversität kaum bewährt, weil die Trennschärfe sehr gering ist und die Dominanzstruktur falsch gewertet wird /30/.

Unserer Ansicht nach ist die Entwicklung einer einzigen Maßzahl zur Charakterisierung einer Lebensgemeinschaft anzustreben, und zwar deshalb, um die Komplexität der Daten zu reduzieren und den Sachverhalt auch für Nichtspezialisten überschaubar zu machen; bei der Gewässergütebeurteilung hat sich dazu der Saprobitätsindex gut

bewährt. Dieser Ansatz wird beim "Gewichteten Zönose-Index" verwendet, der die Individuenzahl, die Artenzahl, die Individuendominanz und "ökologische Gewichte" der einzelnen Arten zu einer einfachen Maßzahl verrechnet /30/. Die Auswertung von Literaturdaten zeigte, daß dieser Index gut mit der verbalen Interpretation der Resultate übereinstimmt (Tab. 1). Der Index wurde so aufgebaut, daß er sich für verschiedene Organismengruppen eignet bzw. leicht modifiziert werden kann. Er ist eine relative Größe und daher nur in Verbindung mit (unbehandelten) Kontroll- bzw. Referenzstandorten anwendbar.

GEWICHTETER ZÖNOSE-INDEX (GZI):

$$\text{GZI} = \sum_{i=1}^S \left(10^8 \cdot \frac{p_i \cdot (1-p_i)^{S-1}}{\left[o_i \cdot (o_{\max} - o_i) + 1 \right]} \cdot \frac{\tilde{n}_{\max} \cdot n_i}{\left[(n_{\max} - \tilde{n}_i) \cdot (\tilde{n}_i - n_{\min}) + 1 \right]} \cdot \frac{w_{1i} \cdot w_{2i} \cdot w_{3i}}{N \cdot S} \right)$$

n_i = Individuenzahl der Art i

\tilde{n}_i = Median der n_i -Werte

n_{\max} = Maximum

n_{\min} = Minimum

N = Gesamtindividuenzahl

o_i = $1 + \text{ld}(n_i)$ = Oktave der Art i (lognormale Verteilung)

o_{\max} = $1 + \text{ld}(n_{\max})$ = höchste Oktave der Probe

p_i = n_i/N = relative Häufigkeit der Art i

S = Gesamtzahl der Arten

w_{1i} = Gewicht 1 der Art i, z. B. Stärke der Bindung an das Biotop

w_{2i} = Gewicht 2 der Art i, z. B. Position im r/K-Kontinuum

w_{3i} = weitere Gewichte

10^8 = Faktor um "handliche" Werte zu erhalten

3. Beispiele aus der Praxis

Es kann heute als gesichert gelten, daß hohe Individuenzahlen, große Artenvielfalt und eine der lognormalen Verteilung angenäherte Dominanzstruktur auf einen Boden mit guter Nährstoffversorgung, hoher Produktivität, rascher Umsetzungsrate und eher hohem, konstantem

Feuchtigkeitsgehalt hinweisen (Fig. 10) /9, 10, 13/. Eine Literaturübersicht über Bodenprotozoen als Bioindikatoren gibt Foissner /10, 11/; die Meso- und Makrofauna referieren Funke /14, 15/ und Schubert /27/.

3. 1 Pestizide

Viele Untersuchungen zeigen, daß mikroskopisch kleine Tiere auf Pestizide genauso empfindlich reagieren wie andere, häufiger benutzte Testorganismen, deren Verwendung aus der Sicht des Tierschutzes zunehmend problematisch wird. Insektizide sind für Bodentiere offenbar toxischer als Herbizide, die eine vergleichsweise geringe und zoologisch gesehen tolerierbare Beeinträchtigung der Bodenfauna bewirken /11, 22/. Pizl /23/ stellte allerdings fest, daß das Herbizid Zeazin zu einem stark erhöhten Befall der Regenwürmer mit Gregarinen (= einzellige Sporentiere) führt.

Petz und Foissner /22/ untersuchten 90 Tage lang die Wirkung des Fungizids Dithan (Wirkstoff Mancozeb) und des Stammschutzmittels Gamma (Insektizid; Wirkstoff Lindan) in normaler (praxisüblicher) und in 10facher Dosis auf die Mikrofauna der Fichtennadelstreu. Im Gegensatz zum Insektizid beeinträchtigte das Fungizid die Bodentiere nur wenig; die Struktur der Schalenamöbengemeinschaft verbesserte sich sogar etwas (Fig. 6, Tab. 1). Dies wird beim "Gewichteten Zönose-Index (GZI) viel deutlicher als beim Diversitätsindex (Tab. 1). Die Wimpertiere, Schalenamöben und Rädertiere wurden nach der Aufbringung von Lindan fast vernichtet (Fig. 6). Die Rädertiere erholten sich bis zum 65. Tag und die Schalenamöben bis zum 90. Tag soweit, daß bezüglich der Individuenzahl kein statistisch absicherbarer Unterschied zur Kontrolle bestand; die hohen GZI-Werte indizieren jedoch noch eine merkliche Beeinträchtigung, d. h. eine Veränderung des Artenbestandes und der Dominanzstruktur (Tab. 1). Die Artenzahl und Gemeinschaftsstruktur der Wimpertiere war nach 90 Tagen ebenfalls noch deutlich verändert (Tab. 1). Die niedrigen Individuen- und Artenzahlen der Wimpertiere (-> hohe GZI-Werte; Tab. 1) sind bei diesem Versuch eindeutig auf den Insektizideinfluß zurückzuführen, weil frische Waldstreu kaum Hemmstoffe enthält und somit viele aktive Wimpertiere vorkommen

Tab. 1. Dokumentation von anthropogenen Einflüssen auf die Strukturparameter Individuenzahl pro g Bodentrockenmasse (I), Artenzahl (A), Gewichteter Zönose-Index (GZI) und Shannon-Wiener Diversität (H) von Protozoen-Gemeinschaften (aus Wodarz et al. /30/).

	Schalenamöben				Wimpertiere			
	I	A	GZI	H	I	A	GZI	H
PESTIZIDE								
Kontrolle, Tag 15	11467	12	16	2.020	1057	33	5	2.386
Kontrolle, Tag 90	9698	12	21	1.989	259	26	53	2.272
Mancozeb, Tag 15	12600	12	7	1.976	1035	31	4	2.050
Mancozeb, Tag 90	13952	11	9	1.980	214	21	94	2.050
Mancozeb (10x), Tag 15	9534	12	8	1.838	728	31	9	2.147
Mancozeb (10x), Tag 90	9823	11	13	1.770	294	24	48	2.004
Lindan, Tag 15	7557	12	28	2.106	66	18	3624	2.620
Lindan, Tag 90	7641	9	61	1.942	161	18	413	2.014
Lindan (10x), Tag 15	7522	9	28	1.750	9	3	36213990	1.099
Lindan (10x), Tag 90	5706	8	77	1.739	388	11	218	1.329
DÜNGER								
Natürlicher Boden	540	23	87	2.628	2	5	874631	1.495
Getrocknetes Pilzmyzel	9	2	44000000	0.693	332	18	83	1.988
Getrocknete Bakterien	1	1	Berechnung sinnlos		225	17	237	2.153
Mineraldünger	1	1	Berechnung sinnlos		57	21	1614	2.525
Begrünte, ungedüngte Planie	0	0	Berechnung sinnlos		5	9	425863	1.624
BODENVERDICHTUNG								
Kontrolle (Kammereffekt)	1816	11	36	1.489	nicht	untersucht		
10% Verdichtung	1709	10	248	1.924	nicht	untersucht		
30% Verdichtung	906	8	973	1.802	nicht	untersucht		
50% Verdichtung	151	5	263718	1.519	nicht	untersucht		

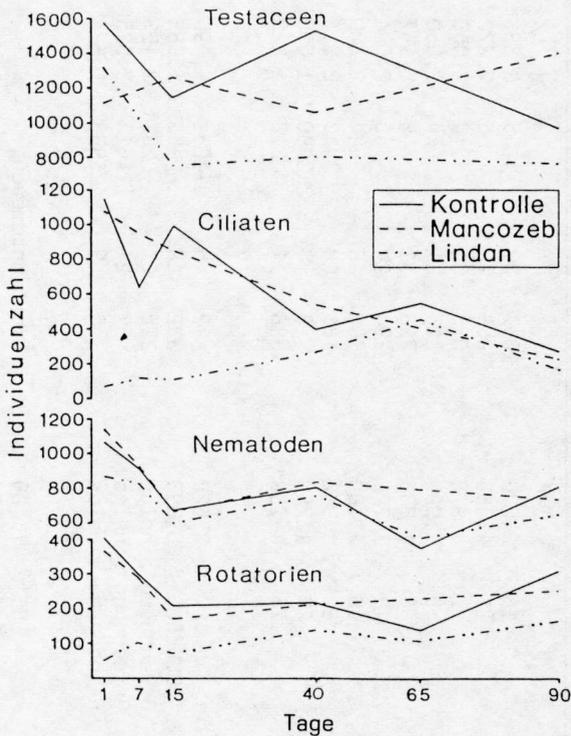


Fig. 6. Auswirkung praxisüblicher Aufwandmengen des Fungizids "Mancozeb" und des Insektizids "Lindan" auf die Anzahl der Bodentiere (Individuen pro g Bodentrockenmasse) in der Streuschicht (0-3 cm) eines Fichtenwaldes (nach Petz und Foissner /22/). Methode: randomisiertes Blockdesign, n = 6; Direktzählung der Kleintiere in wäßriger Bodensuspension.

(vgl. 3. 2). Die Fadenwürmer wurden durch die praxisübliche Lindan-gabe nur wenig beeinflusst (Fig. 6); bei der hohen Dosierung verringerte sich ihre Anzahl zwischen Tag 40 und 90 signifikant, möglicherweise infolge toxischer Metaboliten von Lindan.

Diese Ergebnisse stimmen gut mit jenen aus süddeutschen Fichtenwäldern überein: 18 Monate nach Besprühen der Bodenoberfläche mit den Insektiziden "Ripcord" und "Nexit stark" (80% Lindan) waren keine Unterschiede in der Anzahl der Schalenamöben und Fadenwürmer, jedoch Veränderungen in der Dominanzstruktur festzustellen /24, 29/.

3. 2 Düngerwirkungen

Eine relativ große Anzahl von Untersuchungen zeigt übereinstimmend, daß Düngung und Kalkung zu einer Erhöhung der Populationsdichte der Bodentiere führt, obwohl bei einzelnen Tiergruppen auch ein Rückgang der Individuenzahl beobachtet worden ist /1, 10, 11, 13, 14, 18, 27/. Neuere Studien beschäftigen sich vor allem mit der Frage, welche Dünger (organische oder mineralische "Kunstdünger") das Bodenleben günstig beeinflussen.

Lüftenegger et al. /18/ untersuchten die Auswirkungen von Begrünungsmaßnahmen mit zwei organischen Düngern (getrocknetes Pilzmyzel bzw. getrocknete bakterielle Biomasse) und einem mineralischen Volldünger auf die Mikrofauna einer planierten Schipiste in 2800 m Meereshöhe; die Meso- und Makrofauna fehlt dort praktisch. Alle drei Dünger bewirkten eine signifikante Steigerung des Bodenlebens gegenüber den ungedüngten Kontroll-Parzellen. Die organischen Dünger waren den mineralischen Volldüngern jedoch klar überlegen, d. h. führten zu einem deutlich höheren Anstieg der organischen Substanz des Bodens und der Abundanz und Biomasse der Wimpertiere und Fadenwürmer. Diese Behandlungsunterschiede manifestieren sich sehr gut im "Gewichteten Zönose-Index, jedoch kaum im Diversitätsindex (Tab. 1).

Die niedrigen Individuenzahlen der Wimpertiere (-> hohe GZI-Werte) in den beiden ungedüngten Flächen haben verschiedene Ursachen: Im ungestörten alpinen Boden werden sie durch mikrobielle Hemmstoffe bewirkt, der sogenannten Ciliatostasis /10/, während in der begrüneten, aber ungedüngten Planie offensichtlich Nahrungsmangel herrscht. Die Schalenamöben konnten in den behandelten Rohböden innerhalb von 4 Jahren keine nennenswerten Populationsdichten aufbauen (Tab. 1).

In einem Hochlagenaufforstungsversuch zeigte sich ebenfalls, daß organische Dünger das Bodenleben stärker fördern als Düngerkombinationen mit hohem Anteil an rasch löslichen Nährstoffen (Magnesit bzw. NPK) /1/. Dieser Trend ist sowohl bei der Mikrofauna als auch bei den Bodenenzymen erkennbar (Fig. 7). Deutliche Veränderungen waren auch in der Gemeinschaftsstruktur zu beobachten. In den ungedüngten Böden (pH

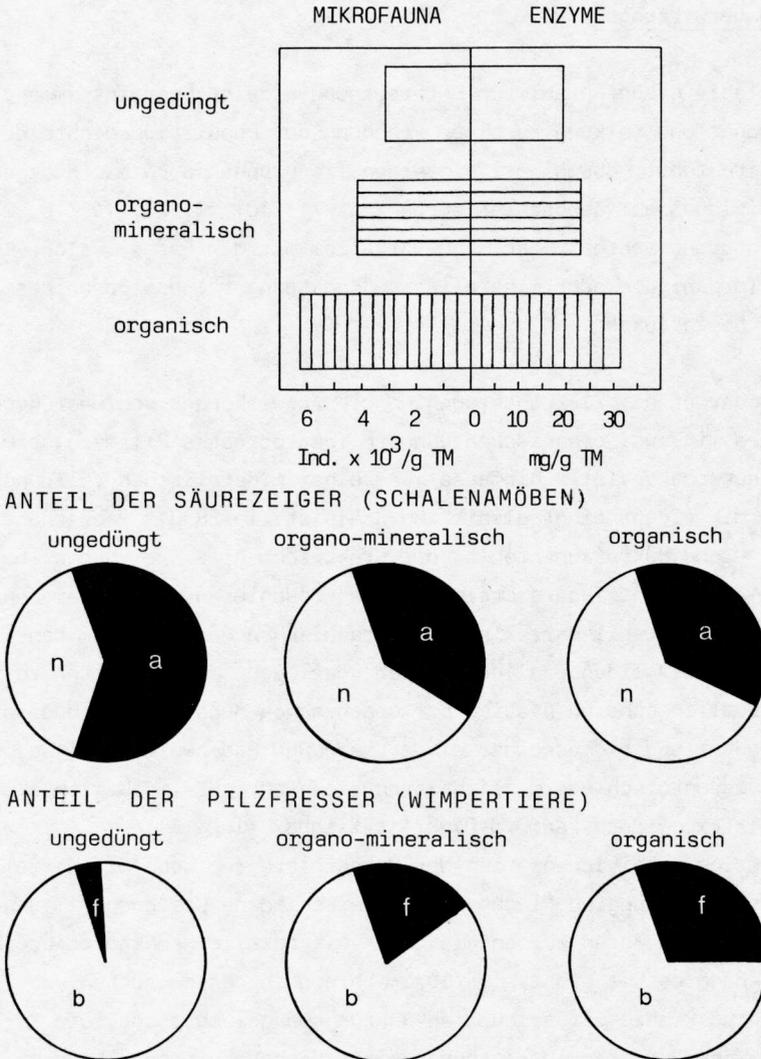


Fig. 7, 8. Wirkung organischer und organo-mineralischer Dünger auf die Bodenorganismen in einem Hochlagenaufforstungsversuch (nach Aescht und Foissner /1/). 7: Anzahl der Bodentiere (Schalenamöben, Wimpertiere, Fadenwürmer, Rädertiere) und Menge der Bodenenzyme (Katalase, Zellulase). 8: Veränderungen in der Gemeinschaftsstruktur der Schalenamöben und Wimpertiere. Methoden: Düngung und Aufforstung 1986, Untersuchung 1986-1990, n = 6; Schalenamöben, Fadenwürmer, Rädertiere: Direktzählung in wäßriger Bodensuspension; Wimpertiere: Kulturmethode. Ungedüngt = Kontrolle, organisch = 4 verschiedene Dosierungen von getrockneter bakterieller Biomasse, organo-mineralisch = verschiedene Dosierungen von 6 Düngerkombinationen mit hohem mineralischen Anteil (Rohmagnesit, NPK). a = säuretolerant, n = säureintolerant, b = Bakterienfresser (bakteriovor), f = Pilzfresser (fungivor).

etwa 3) dominierten säuretolerante Schalenamöben-Arten, deren Anteil sich in den gedüngten Standorten mit höheren pH-Werten signifikant verringerte (Fig. 8). Bei den Wimpertieren erhöhte sich der Anteil pilzfressender Arten in den behandelten Flächen deutlich, und zwar in den organisch gedüngten Standorten mehr als in den organo-mineralisch behandelten (Fig. 8). Dies indiziert ein verstärktes Pilzwachstum, d. h. eine Steigerung der biologischen Aktivität.

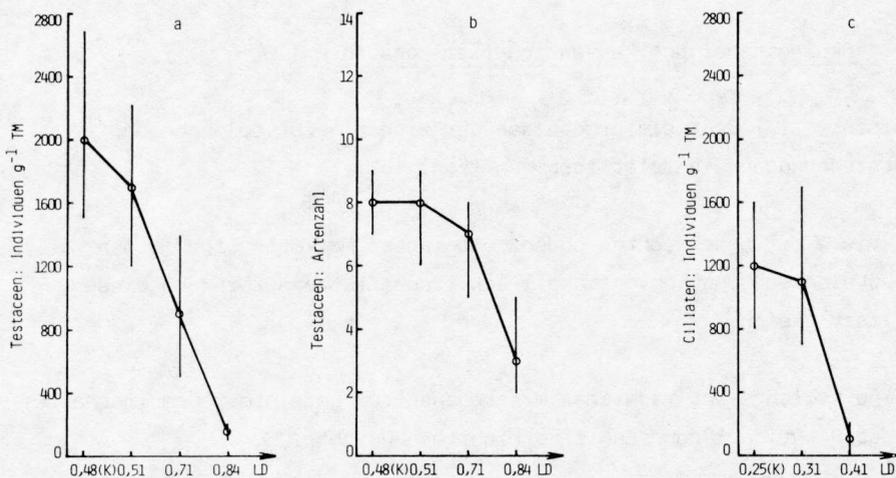


Fig. 9a-c. Wirkung der Bodenverdichtung auf die Schalenamöben und Wimpertiere. 9a, b: Freiland-Experiment mit dem humusreichen Oberboden (0-5 cm) einer Almweide in ca. 2000 m Meereshöhe (nach Berger et al. /5/). Methode: randomisiertes Block-Design, $n = 3$; Verdichtungskammern mit 500 cm^3 ; Dauer der Verdichtung: 12 Wochen; Schalenamöben: Direktzählung in wässriger Bodensuspension. 9c: Laborexperiment mit dem Humushorizont eines Mischwaldes (nach Couëteux /8/). Methode: Verdichtungskammern mit 4 g Humus, $n = 3$; Dauer der Verdichtung: 9 Wochen; Wimpertiere: Direktzählung und Berechnung ihrer Anzahl mit einer "most probable number"-Methode. K = Kontrolle (unverdichteter Boden), LD = Lagerungsdichte (kg/dm^3), TM = Bodentrockenmasse.

3. 3 Bodenverdichtung

Die Bodenverdichtung durch schwere Landmaschinen und zu intensive Bodennutzung ist weltweit ein großes Problem. Freiland- und Labor-experimente zeigen übereinstimmend eine verdichtungsabhängige Abnahme der Individuen- und Artenzahl der Protozoen /5, 7, 8/ (Fig. 9).

Erste Auswirkungen der Verdichtung sind bereits nach einer Woche erkennbar und schon eine geringe Bodenverdichtung (z. B. Erhöhung der Lagerungsdichte von 0,48 auf 0,51) beeinträchtigt die Bodentiere und wohl auch die Pflanzenwurzeln merklich /5, 7/. Bei den Schalenamöben werden große Arten stärker unterdrückt als kleine; seltenere sind nach starker Kompression (ab 30%) nicht mehr nachweisbar. Daher kommt es zu deutlichen Verschiebungen in der Gemeinschaftsstruktur, die durch den "Gewichteten Zönose --Index" sehr deutlich wiedergespiegelt werden (Tab. 1).

3. 4 Ökologischer und konventioneller Landbau

Foissner /12/ faßt die Ergebnisse der bisher dazu vorliegenden Untersuchungen wie folgt zusammen (Fig. 10):

- * Viele der untersuchten bodenzoologischen Merkmale sind in den ökologisch und konventionell bewirtschafteten Äckern und Wiesen fast gleich.
- * Auffallende Unterschiede im Artenspektrum und in der Gemeinschaftsstruktur der Protozoen sind nicht nachweisbar.
- * Alle statistisch absicherbaren Unterschiede weisen in Richtung einer höheren biologischen Aktivität der ökologisch bewirtschafteten Flächen. Die zum Teil parallel mitgeführten bodenkundlichen Untersuchungen deuten darauf hin, daß dafür der etwas höhere Humusgehalt und der etwas lockerere Boden verantwortlich sind.
- * In Ackerflächen aus Trockengebieten ohne Viehwirtschaft (z. B. Marchfeld in Niederösterreich) beeinträchtigt die konventionelle Landwirtschaft die Bodentiere stärker als in der atlantischen Klimazone (z. B. Salzburg) mit gemischter Wirtschaft. Nur in den extremen Gebieten, wo z. B. Wasser ein begrenzender Faktor ist, wird das Bodenleben durch die Intensivwirtschaft schwer gestört.

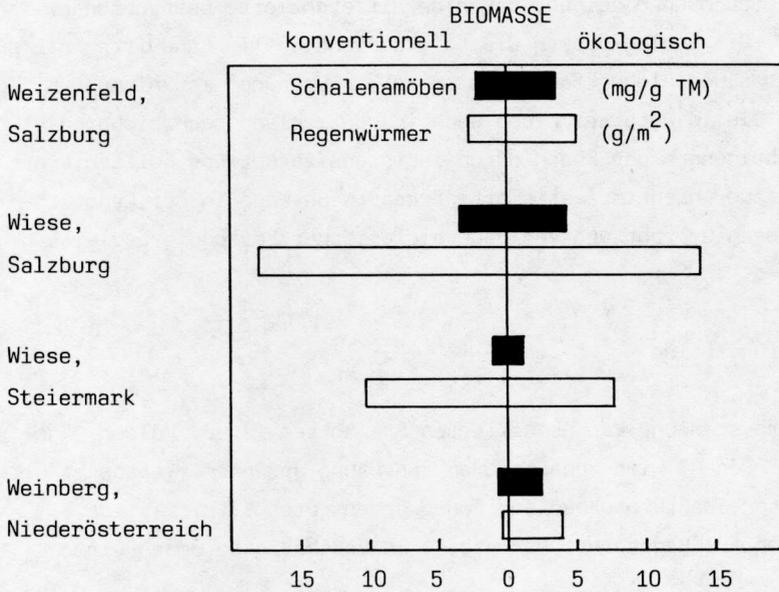


Fig. 10. Biomasse der Schalenamöben und Regenwürmer in konventionell und ökologisch bewirtschafteten Flächen (nach Foissner /12/). Methoden: Mittelwerte aus je 4-8 Untersuchungen; Schalenamöben: Direktzählung in wäßriger Bodensuspension; Regenwürmer: Formaldehydextraktion.

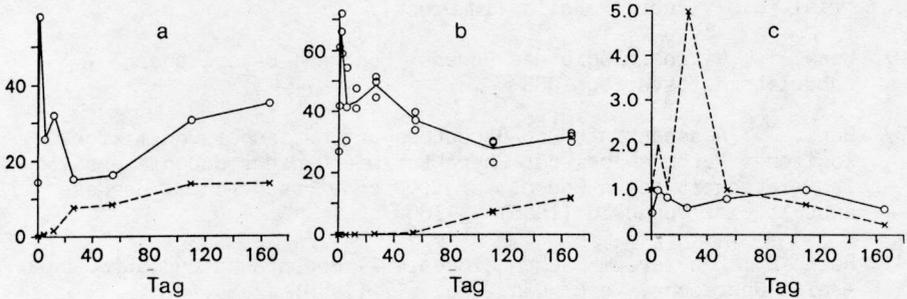


Fig. 11a-c. Rekolonisation von sterilisiertem Boden einer Weide durch Protozoen (Amöben, Geißeltiere, Wimpertiere) und Fadenwürmer (aus Yeates et al. /31/). 11a: Gesamtindividuenzahl der Protozoen x 1000 pro g Bodentrockenmasse. 11b: Individuenzahl der Fadenwürmer pro g Bodentrockenmasse. 11c: Verhältnis der colpodiden und polyhymenophoren Wimpertiere (C/P-Index). Methode: Methylbromid-Fumigation, n = 3; Nacktamöben, Geißeltiere, Wimpertiere: "most probable number"-Methode; Schalenamöben: Direktzählung in wäßriger Bodensuspension; Fadenwürmer: Seinhorst-Extraktion. o—o Kontrolle, x—x behandelt.

Diese Untersuchungen zeigen, daß eine differenzierte Betrachtungsweise nötig ist. Mit Schlagwörtern wie "die konventionelle Landwirtschaft zerstört das Bodenleben" oder "alles ist in Ordnung" ist niemandem geholfen. Die in Österreich und auch in Deutschland nachweisbaren Beeinträchtigungen der Böden durch zu intensive Nutzung sollten ernst genommen, aber nicht dramatisiert werden. Neue Wege in der Landwirtschaft müssen erprobt und von bodenbiologischer Forschung begleitet werden.

3. 5 Rekolonisation

Die Wiederbesiedlung von devastierten Standorten (z. B. Halden, "gereinigten" Böden) wird zunehmend an Bedeutung gewinnen. Yeates et al. /31/ zeigten, daß Protozoen und Fadenwürmer gute mittelfristige Indikatoren für Regenerationsprozesse in geschädigten Böden sind (Fig. 11).

4. Literatur

- /1/ Aescht, E., Foissner, W.: Effects of mineral and organic fertilizers on the microfauna in a high altitude reforestation trial. Biol. Fertil. Soils (im Druck).
- /2/ Beck, T.: Mikrobiologie des Bodens. München: Bayerischer Landwirtschaftsverlag 1968.
- /3/ Beck, T.: Aussagekraft und Bedeutung enzymatischer und mikrobiologischer Methoden bei der Charakterisierung des Bodenlebens von landwirtschaftlichen Böden. Veröff. Landwirtsch.-chem. Bundesanstalt Linz/Donau 18 (1986) 75-100.
- /4/ Beck, L.: Lebensraum Buchenwaldboden 1. Bodenfauna und Streuabbau - eine Übersicht. Verh. Ges. Ökol. 17 (1989) 47-54.
- /5/ Berger, H., Foissner, W., Adam, H.: Protozoologische Untersuchungen an Almböden im Gasteinertal (Zentralalpen, Österreich). IV. Experimentelle Studien zur Wirkung der Bodenverdichtung auf die Struktur der Testaceen- und Ciliatenzönose. Veröff. Österr. MaB-Programms 9 (1985) 97-112.
- /6/ Blum, W. E. H., Kromp, B., Maurer, L., Rampazzo, N., Smoliner, C., Wright, J.: Forschungskonzept 1990. Bodenforschung Bodenbiologie. Schwerpunkt Landwirtschaft. Wien: Bundesministerium für Wissenschaft und Forschung 1990.

- /7/ Coûteaux, M.-M.: The effects of compressing forest litter (H layer) on the populations of testate amoebae. *Revue Ecol. Biol. Sol* 22 (1985a) 447-461.
- /8/ Coûteaux, M.-M.: Relation entre le densité apparente d'un humus et l'aptitude à la croissance de ses ciliés. *Pedobiologia* 28 (1985b) 289-303.
- /9/ Foissner, W.: Die Gemeinschaftsstruktur der Ciliatenzönose in alpinen Böden (Hohe Tauern, Österreich) und Grundlagen für eine Synökologie der terricolen Ciliaten (Protozoa, Ciliophora). Veröff. Österr. MaB-Programms 4 (1981) 7-52.
- /10/ Foissner, W.: Soil protozoa: fundamental problems, ecological significance, adaptations in ciliates and testaceans, bioindicators, and guide to the literature. *Progr. Protistol.* 2 (1987a) 69-212.
- /11/ Foissner, W.: Ökologische Bedeutung und bioindikatives Potential der Bodenprotozoen. *Verh. Ges. Ökol.* 16 (1987b) 45-52.
- /12/ Foissner, W.: Comparative studies on the soil life in ecofarmed and conventionally farmed fields and grasslands of Austria. *Proc. Soil Biol. Soc. Pisa* (im Druck).
- /13/ Franz, H.: *Bodenzoologie als Grundlage der Bodenpflege*. Berlin: Akademie Verlag 1950.
- /14/ Funke, W.: Tiergesellschaften im Ökosystem "Fichtenforst" (Protozoa, Metazoa - Invertebrata) - Indikatoren von Veränderungen in Waldökosystemen. *Kernforschungszentrum Karlsruhe-PEF* 9 (1986) 1-150.
- /15/ Funke, W.: Wirbellose Tiere als Bioindikatoren in Wäldern. *VDI-Berichte* 609 (1987) 133-176.
- /16/ Huber, H. C., Huber, W., Ritter, U.: Einfache in vitro-Prüf-systeme zur Toxizitätsbestimmung von Umweltchemikalien: Mikrokulturen menschlicher Lymphozyten und monoxenische Ciliatenkulturen. *Zentbl. Hyg.* 189 (1990) 511-526.
- /17/ Lüftenegger, G., Foissner, W., Adam, H.: r- and K-selection in soil ciliates: a field and experimental approach. *Oecologia* 66 (1985) 574-579.
- /18/ Lüftenegger, G., Foissner, W., Adam, H.: Der Einfluß organischer und mineralischer Dünger auf die Bodenfauna einer planierten, begrüneten Schipiste oberhalb der Waldgrenze. *Z. Vegetations-technik* 9 (1986) 149-153.
- /19/ Müller-Motzfeld, G.: Laufkäfer (Coleoptera: Carabidae) als pedobiologische Indikatoren. *Pedobiologia* 33 (1989) 145-153.

- /20/ Nilsson, J. R.: Tetrahymena in cytotoxicology: with special reference to effects of heavy metals and selected drugs. Europ. J. Protistol. 25 (1989) 2-25.
- /21/ Ottow, J. C. G.: Mikrobiologische und chemisch-physikalische Wechselwirkungen beim Abbau organischer Schadstoffe in Böden. Mitt. Dt. Bodenk. Ges. 63 (1991) 19-26.
- /22/ Petz, W., Foissner, W.: The effects of mancozeb and lindane on the soil microfauna of a spruce forest: a field study using a completely randomized block design. Biol. Fertil. Soils 7 (1989) 225-231.
- /23/ Pizl, V.: The effect of the herbicide Zeazin 50 on the earthworm infection by monocystid gregarines. Pedobiologia 28 (1985) 399-402.
- /24/ Ratajczak, L., Funke, W., Zell, H.: Die Nematodenfauna eines Fichtenforstes: Auswirkungen anthropogener Einflüsse. Verh. Ges. Ökol. 17 (1989) 391-396.
- /25/ Schaefer, M.: Waldschäden und die Tierwelt des Bodens. Allg. Forstz. 27 (1985) 676-679.
- /26/ Schinner, F.: Die Bedeutung der Mikroorganismen und Enzyme im Boden. Veröff. Landwirtsch.-chem. Bundesanstalt Linz/Donau 18 (1989) 15-39.
- /27/ Schubert, K. (Hrsg.): Bioindikation in terrestrischen Ökosystemen. Stuttgart: Fischer Verlag 1985.
- /28/ Sládeček, V.: System of water quality from the biological point of view. Arch. Hydrobiol. Beih. Ergebn. Limnol. Planktonk. 7 (1973) I-IV + 1-218.
- /29/ Wanner, M., Funke, W.: Zur Mikrofauna von Waldböden: I. Testacea (Protozoa: Rhizopoda) Auswirkungen anthropogener Einflüsse. Verh. Ges. Ökol. 17 (1989) 379-384.
- /30/ Wodarz, D., Aesch, E., Foissner, W.: A "Weighted Coenotic Index" (WCI): description and application to soil animal communities. Biol. Fertil. Soils (im Druck).
- /31/ Yeates, G. W., Bamforth, S. S., Ross, D. J., Tate, K. R., Sparling, G. P.: Recolonization of methyl bromide sterilized soils under four different field conditions. Biol. Fertil. Soils 11 (1991) 181-189.