©Bayerische Akademie für Naturschutz und Landschaftspflege (ANL)

Ber. ANL | 22 (1998) | 131-151

Bodenzoologische Untersuchungen auf bayerischen Waldboden-Dauerbeobachtungsflächen (BDF) als Bestandteil eines vorsorgenden Bodenschutzes

Humusfeinerfassung, Regenwurm- und Collembolenaufnahmen im Rahmen des vorsorgenden Bodenschutzes im Wald

Karl-H. MELLERT; K. SCHÖPKE; A. SCHUBERT

Gliederung

1. Einleitung **131**

1.1 Grundlagen der BDF 131
1.2 Ziele der BDF 132
1.3 Flächenaufbau 132
1.4 Untersuchungsprogramm 132
1.5 Die untersuchten BDF 132

2. Der Humus – Substrat und Lebensraum **134**

2.1 Der Humuskörper – Entstehung und Bedeutung 134
2.2 Methodik der Humusformenaufnahme 135
2.3 Ergebnisse 135
2.4 Zusammenfassung der Ergebnisse und Interpretation 136

3. Bodenfauna (Regenwürmer, Springschwänze) **137**

3.1 Untersuchung der Regenwurmfauna 139
3.1.1 Lebensweise der Regenwürmer und Bedeutung für die Eigenschaften des Bodens 139
3.1.2 Methode 140
3.1.3 Ergebnisse 141
3.1.4 Interpretation der Ergebnisse 141
3.2 Untersuchung der Springschwanzfauna 142
3.2.1 Bedeutung der Springschwänze für die Eigenschaften des Bodens 142
3.2.2 Methode 143
3.2.3 Ergebnisse 143
3.2.4 Bewertung der Ergebnisse 145
3.3 Regenwürmer und Springschwänze – ein Vergleich 146

4. Schlussfolgerungen und Ausblick **148**
5. Zusammenfassung **150**
7. Literatur **150**

1. Einleitung

Der Boden und die Bodenlebewelt (das Edaphon) bilden eine untrennbare Einheit. Die Lebenstätigkeit des Edaphon ist mitbestimmend – im Oberboden sogar ausschlaggebend – für die Ausprägung der Bodeneigenschaften. Bodenorganismen sind damit einerseits Träger wichtiger Bodenfunktionen (Filter-Puffer- und Transformator-Funktion), deren Schutz durch das neue Bundesbodenschutzgesetz (Entwurf vom 25.09.1996) gewährleistet werden soll. Andererseits sind sie selbst Schutzobjekt beim Schutz der Lebensraumfunktion von Böden.

Die Voraussetzung für einen wirkungsvollen Schutz ist eine gute Kenntnis der Bodenlebewelt.

Untersuchungen von Bodentieren auf Bodendauerbeobachtungsflächen (BDF) helfen diese Aufgaben zu erfüllen, denn sie erweitern unser bodenökologisches Wissen, und sie geben uns Hinweise auf anthropogene Änderungen des biologischen, chemischen und physikalischen Bodenzustands.

Die Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF) hat deshalb die Wechselwirkung von Bodenfauna und Humuszustand in bayerischen Waldböden sowie die Eignung von Regenwürmern und Collembolen zur Bioindikation auf verschiedenen Standorten untersucht.

1.1 Grundlagen der BDF

Unsere Böden waren und sind vielen Einflußfaktoren ausgesetzt. Stoffeinträge und mechanische Belastungen zum Beispiel beanspruchen die Böden in vielfältiger Art und Weise. Böden erfüllen aber zentrale und wichtige Funktionen in den Ökosystemen und verdienen unseren Schutz, genauso wie Wasser und Luft.

Chemische wie physikalische Prozesse laufen im Boden sehr langsam ab und überlagern sich häufig. Dem Betrachter vermitteln Momentaufnahmen nur ein unvollständiges Bild der Zusammenhänge im Boden. Um Veränderungen sowohl qualitativ wie quantitativ und in ihrer Ablaufgeschwindigkeit zu erfassen, sind langfristige Beobachtungen nötig.

Einen wesentlichen Schwerpunkt im bayerischen Konzept des vorsorgenden Bodenschutzes im Wald stellen die Waldboden-Dauerbeobachtungsflächen dar. Sie dienen als Monitor für Veränderungen im Teilkompartiment Waldboden innerhalb des Waldökosystems.

Die Waldboden-Dauerbeobachtungsflächen der Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF) sind in ein bayernweites System von Boden-Dauerbeobachtungsflächen unterschiedlicher Landnutzungsformen eingebunden. Dabei ist die Landesanstalt für Bodenkultur und Pflanzenbau (LBP) für die landwirtschaftlichen Flächen zuständig, während das Geologische Landesamt (GLA) sogenannte Sonderflächen bearbeitet.

©Bayerische Akademie für Naturschutz und Landschaftspflege (ANL)

1.2 Ziele der BDF

Die Waldboden-Dauerbeobachtungsflächen verfolgen nachstehende Ziele:

- einen landesweiten Überblick des gegenwärtigen Nährstoff- und Schadstoffpotentials flächenbedeutsamer Standorte und ihrer Waldbestände zu erhalten (Eine Grunderhebung zur Ersterfassung des aktuellen Zustandes)
- durch periodische Untersuchungen des Bodenzustandes und der Vegetation langfristige Veränderungen als Folge standorts-, belastungs- und nutzungsspezifischer Einflüsse zu ermitteln (Erfassung von Veränderungen).

Im Gegensatz zum Programm der Bodendauerbeobachtung anderer Instutitionen wird auf den Waldboden-Dauerbeobachtungsflächen der LWF über die reine Erfassung von Bodenkenndaten hinaus besonderes Gewicht darauf gelegt, diese in Beziehung zu anderen Teilen des Ökosystems Wald zu setzen.

Darüberhinaus ist ein wesentliches Merkmal des Waldboden-Dauerbeobachtungsprogramms der LWF, daß es flexibel auf derzeitige und zukünftige Anforderungen ausgerichtet ist. Es eröffnet einerseits die Möglichkeit zur Verknüpfung mit Untersuchungsvorhaben der LWF, den parallel laufenden BDF-Programmen der LBP und des GLA und universitären Forschungen zu gewährleisten, andererseits zukünftigen, neuen oder veränderten Fragestellungen gerecht zu werden.

1.3 Flächenaufbau

Um zeitverschiedene Untersuchungen an Böden miteinander vergleichen zu können, ist es unerläßlich die Variabilität der Böden zu erfassen. Für statistische Auswertungen ist daher eine flächenrepräsentative Probenahme die Vorausetzung.

Die Flächen haben in der Regel eine Größe von 0,25 ha (50 x 50 m). Sie sind unterteilt in eine Kernzone (30 x 30 m), auf der die flächige Bodenprobenahme durchgeführt wird und die umgebende Randzone auf der zusätzliche Untersuchungen stattfinden, wie Humusfeinerfassung, Regenwurm- und Collembolenaufnahmen

1.4 Untersuchungsprogramm

- Boden
  - Bodenpysikalische Untersuchungen
    Korngrößenverteilung, Trockenraumdichte, Radionuklidaktivität (Cs_{134} und Cs_{137})
  - Bodenchemische Untersuchungen
    ph-Wert, austauschbare Kationen (0,5 m NH_4Cl Extrakt), Gesamtkohlenstoff und Stickstoff, Nähr- Spurenelemente und Schwermetalle (Königswasseraufschluß)
  - Zusatzuntersuchungen auf ausgewählten BDF
    Tonmineraluntersuchungen, **Humusfeinerfassung, Regenwurm- und Collembolen-aufnahmen**
- Nadeln/Blätter
  Gesamtkohlenstoff und Stickstoff, Nähr- Spurenelemente und Schwermetalle (HNO_3 Aufschluß)
- Vegetation
  Vegetationsaufnahmen nach Braun-Blanquet (Baum-, Kraut-, Moosschicht), Flechten-aufnahmen

1.5 Die untersuchten BDF

Als Basisinformation werden die Flächen zu Beginn in knapper, stichpunktartiger Form vorgestellt. Die Reihenfolge entspricht einer Gliederung nach Standortseinheit, Bodentyp und Humusform. Diese Reihenfolge spiegelt auch die abnehmenden Gehalte an austauschbaren, basichen Kationen in den Böden der Flächen 1 bis 5 wieder.

Das untersuchte Standortspektrum reicht vom tiefgründig basengesättigten Mullboden bis zu basenarmen Böden mit – allerdings basenreicher – Rohhumusauflage (siehe Tab. 1).

Tabelle 1

Basensättigungsgrad in den Bodenhorizonten der fünf Wald-BDF (nach AG BODEN, BODENKUNDLICHE KARTIERANLEITUNG 1994).

Basensättigung	BDF-Gei 2	BDF-Fre	BDF-Kel 1	BDF-Gei 1	BDF-Kel 2
sehr basenreich bis gesättigt (80-100%)	Auflage (L-Mull), A-, B-, C-Horizonte	Auflage (F-Mull), B-Horizonte			
basenreich (50-80%)		A-Horizonte	Auflage (F-Mull)	Auflage (rohhumusartiger Moder)	Auflage (typischer Rohhumus)
mittelbasisch (20-50%)			A-, B-Horizonte	A-Horizonte	
basenarm (5-20%)				B-Horizonte	A-, B-Horizonte
sehr basenarm (<5%)					

©Bayerische Akademie für Naturschutz und Landschaftspflege (ANL)

Wald-BDF Geisenfeld 2

Lage	WG 12 (Tertiäres Hügelland); WB 2 (IngoldtädterDonauniederung) ; TWB 1 (Donauau)
Relief	Höhe ü. NN.: 364m; Hangneigung: 0,5°; Exposition: Nord
Klima	Mittlere Lufttemperatur : 7,5-8,5° C ; mittlere Niederschlagshöhe: 670-730 mm
Geologie	Quartärer Schotter/Sand
Standortseinheit	Feuchte, stark humose Sande
Bodentyp	Anmoor-Gley
Vegetation	Ein 85-jähriger, geschlossener, zweischichtiger Schwarzerlen-Eschen- Bergahorn Bestand, mit anspruchsvoller, artenreicher Krautschicht als Bodenvegetation

Wald-BDF Freising

Lage	WG 12 (Tertiäres Hügelland); WB 8 (Oberbayerisches Tertiärhügelland)
Relief	Höhe ü. NN.: 505m; Hangneigung: 3°; Hanglage: flacher Mittelhang; Exposition: Süd
Klima	Mittlere Lufttemperatur : 7-8° C; mittlere Niederschlagshöhe: 750-850 mm
Geologie	Limnisch-fluviatile Sedimente der miozänen oberen Süßwassermolasse
Standortseinheit	Frischer Feinlehm mit Verdichtung im Unterboden
Bodentyp	Parabraunerde-Braunerde , pseudovergleyt
Vegetation	Ein 140-jähriger, geschlossener, mehrschichtiger Buchen-Eichen Bestand mit Buchennebenbestand, mit artenarmer Krautschicht als Bodenvegetation

Wald-BDF Kelheim 1

Lage	WG 6 (Frankenalb und oberpfälzer Jura); WB 2 (Südliche Frankenalb und südlicher oberpfälzer Jura)
Relief	Höhe ü. NN.: 490m; Hangneigung: 2°; Hanglage: Oberhang; Exposition: West
Klima	Mittlere Lufttemperatur: 7,5-8,5° C; mittlere Niederschlagshöhe: 660-790 mm
Geologie	Knollenmergel und Mergel der Oberkreide
Standortseinheit	Beginnend bis mäßig wechselfeuchter Schichtfeinlehm mit Verdichtung im Unterboden
Bodentyp	Parabraunerde-Pseudogley
Vegetation	Ein 90-jähriger, geschlossener, mehrschichtiger Fichten-Kiefern-Buchen Bestand, mit relativ artenreicher Krautschichtals Bodenvegetation

Wald-BDF Geisenfeld 2

Lage	WG 12 (Tertiäres Hügelland); WB (Oberbayerisches Tertiärhügelland)
Relief	Höhe ü. NN.: 425m; Hangneigung: 6°; Hanglage: Oberhang; Exposition: Nordwest
Klima	Mittlere Lufttemperatur: 7-7,5 ° C; mittlere Niederschlagshöhe: 730-890 mm
Geologie	Sande der miozänen, oberen Süßwassermolasse
Standortseinheit	Mäßig frische, schwachlehmige, podsolierte Sande
Bodentyp	Podsol-Braunerde
Vegetation	Ein geschlossener, zweischichtiger Kiefern-Fichten-Tannen Bestand, mit relativ anspruchsloser , artenarmer Krautschicht als Bodenvegetation

Wald-BDF Kelheim 2

Lage	WG 6 (Frankenalb und oberpfälzer Jura) ; WB 2 (Südliche Frankenalb und südlicher, oberpfälzer Jura)
Relief	Höhe ü. NN.: 490m ; Hangneigung:5°; Hanglage: Oberhang; Exposition: Ost-Südost
Klima	Mittlere Lufttemperatur: 7,5 - 8,5° C; mittlere Niederschlagshöhe: 660-790 mm
Geologie	Knollensande der Oberkreide
Standortseinheit	Mäßig wechselfeuchter Schichtschluff mit Verdichtung im Unterboden
Bodentyp	Braunerde-Podsol, pseud overgleyt
Vegetation	Ein 70-jähriger, geschlossener, zweischichtiger Fichten-Kiefern Bestand, mit anspruchsloser, artenarmer Krautschicht als Bodenvegetation

©Bayerische Akademie für Naturschutz und Landschaftspflege (ANL)

Tabelle 2

Die morphologischen Merkmale der Humusprofile (sortiert nach Humusformen).

	Horizonte	Gei 2	Fre	Kel 1	Gei 1	Kel 2
Herkunft der Streu[1]		Gras, Er	Bu, Ei	Fi, Bu, (Ki)	Fi, Ki, Bu	Fi, Lä, (Bu, Er)
Dauer der Streuzersetzung		sehr schnell (wenige Monate bis 1 Jahr)	mäßig	langsam bis mäßig (1-10 Jahre)	langsam bis mäßig	langsam (> 10 Jahre)
Mächtigkeit (cm) des Auflagehumus	L	0.6	3,2	1,5	1,5	1,3
	Of	-	1,4	2,5	2,2	3,3
	Oh	-	-	0,9	2,5	2,6
	gesamt	0,6	4,6	4,9	6,2	7,2
TS (g/m²)	L	643	633	1248	1078	987
	Of	-	1230	2509	1955	3153
	Oh	-	-	1836	5262	3913
	gesamt	643	1863	5593	8255	8053
humushaltiger Mineralboden: Ausbildung		Ah	Ah	Ah	Aeh-Ahe	Aeh
Mächtigkeit (cm)		10, 5	2,2	1,9	1,3 -0,6	1,9
Begrenzung des Ah zum angrenzenden humusarmen/-freienHorizont[2]		undeutlich (< 5 cm) bis fließend (< 5 cm)	deutlich (< 2 cm) bis sehr deutlich (< 1 cm)	bei muilart. Moder: sehr deutlich (< 1cm) bis scharf (< 0,3 c m)	entfällt	entfällt
Schärfe der Übergänge zwischen den Horizonten[2]		entfällt	entfällt	bei typ. Moder: unscharf (0,3-0,6 cm) bis scharf (< 0,3 c m)	scharf (< 0,3 cm) bis sehr scharf (linienhaft)	sehr scharf (linienhaft)
Humusform		**L-Mull** (L-Ah)	**F-Mull** (L-OF-Ah)	3 x F-Mull (L-OF-Ah), 7 x **mullartiger Moder** (L-Of-Oh-Ah), 5 x **typischer Moder** (L-Of-Oh-A(e)h)	10 x **rohhumusartiger Moder** (L-Of-Oh-Ahe), 5 x typischer Rohhumus (L-Of-Oh-Ae h-Ae)	**typischer Rohhumus** (L-Of-Oh-Ae h-Ae)

[1] Bu Buche
Ei Stieleiche
Er Schwarzerle
Fi Fichte
Ki Kiefer
Lä Lärche

[2] nach AK Standortskartierung (1996)

Die Variation der Basensättigung ist in der Auflage im untersuchten Standortspektrum also gering, sie reicht von basengesättigt bis basenreich. Im humosen Mineralboden (A-Horizont) und im B-Horizont reicht das Spektrum von basengesättigt bis basenarm und ist damit wesentlich breiter. Sehr basenarme Böden wurden nicht untersucht.

2. Der Humus – Substrat und Lebensraum

2.1 Der Humuskörper – Entstehung und Bedeutung

Der Begriff Humus kennzeichnet die Gesamtheit des toten organischen (d.h. tierischen und pflanzlichen) Materials und die davon abstammenden organischen Stoffe auf und im Boden. Der Humus wird unterschieden in

- Auflagehumus: Gesamtheit der makroskopisch erkennbaren Pflanzenteile und der organischen Feinsubstanz, die dem Mineralboden aufliegen; Anteil der organischen Substanz >30% – und in
- Mineralbodenhumus: Gesamtheit des Humus in allen mineralischen Horizonten; Anteil der organischen Substanz <30% (AG Boden, 1994).

Aufgrund der Aktivität von Bodenorganismen finden im Humus verschiedene Umwandlungsprozesse statt: Struktureller Abbau der Streu, Einmischung in den Mineralboden (Bioturbation), weiterführender Aufschluß der organischen Substanz bis zur Zerlegung in ihre anorganischen Bestandteile (Mineralisation) sowie Umwandlung in hochmolekulare Humusstoffe (Humifizierung) (vgl. Kapitel 3).

Der Humushaushalt des Bodens ist abhängig von der Geschwindigkeit und damit dem Vorherrschen einzelner dieser humusbildenden Prozesse, somit von der geförderten bzw. gehemmten Aktivität bestimmter Bodenorganismen-Gruppen. Durch eine Reihe ineinandergreifender Faktoren wird dies beeinflußt:

©Bayerische Akademie für Naturschutz und Landschaftspflege (ANL)

Tabelle 3

Ergebnisse der horizontbezogenen Messungen.

		Gei 2	Fre	Kel 1	Gei 1	Kel 2
pH-Wert	**L**	**6,03**	**5,99**	**4,91**	**4,66**	**4,42**
(H_2O)	Of	-	5,58	4,29	4,16	3,96
	Oh	-	-	3,83	3,70	3,45
	A	**4,63**	**4,22**	**3,83**	**3,6 7**	**3,4 8**
pH-Wert	**L**	**5,50**	**5,51**	**4,39**	**4,16**	**3,92**
($Ca\ Cl_2$)	Of	-	5,16	3,80	3,41	3,26
	Oh	-	-	3,30	3,02	2,87
	A	**4,30**	**3,83**	**3,39**	**3,13**	**2,98**
C-Gehalt	L	39,61	45,36	45,75	48,20	48,11
(%)	Of	-	39,61	40,91	45,73	48,22
	Oh	-	-	27,43	26,68	44,28
	A	7,55	8,16	1,87	1,69	1,88
N-Gehalt	L	2,00	1,15	1,30	1,34	1,37
(%)	Of	-	1,74	1,50	1,80	1,63
	Oh	-	-	1,18	1,04	1,48
	A	0,68	0,49	0,090	0,074	0,079
C/N-	L	19,80	39,34	35,19	35,97	35,12
Verhältnis	Of	-	22,78	27,27	25,41	29,58
	Oh	-	-	23,25	25,65	29,92
	A	11,10	16,75	20,74	22,80	23,77
org. Substanz	L	68,29	90,72	78,87	83,10	82,94
(%)	Of	-	79,22	70,53	78,84	83,13
	Oh	-	-	47,29	46,00	76,34
	A	13,02	14,03	3,22	2,91	3,24

pH-Wert, Durchlüftung, Feuchtigkeit, Temperatur, Stickstoff- und Phosphorangebot der Streu sowie Streumenge und Streuqualität, also dem Verhältnis von leicht zu schwer abbaubaren organischen Stoffen (Maß für die Zersetzbarkeit der Streu: C/N- bzw. C/P-Verhältnis oder Lignin/Protein-Verhältnis).

Auf diese Weise entstehen verschiedene Humusformen, Erscheinungsbilder des Humuskörpers, mit charakteristischen Folgen von Auflage- und Mineralbodenhorizonten (siehe auch Abb. 1)

Die dort vorhandenen, mit unterschiedlichen Eigenschaften ausgestatteten organischen Substanzen setzen, im Zuge der Streuzersetzung durch die Bodenfauna (siehe Kap. 3), in mehr oder weniger starkem Maße organisch gebundene Nährelemente (N, S, P, Mg, Fe) frei. Die Geschwindigkeit der Streuzersetzung ist ausschlaggebend für die Höhe der freigesetzten, pflanzenverfügbaren Nährstoffe.

2.2 Methodik der Humusformenaufnahme

Die fünf BDF wurden jeweils im Winter beprobt. Pro Fläche wurden 10-15 Humusziegel ausgestochen. Die Vorgehensweise ist in SCHUBERT et al. (1995) beschrieben.

Im Labor wurde jedes Humusprofil detalliert beschrieben und in Horizonte unterschieden. Die Horizonte wurden getrennt bei 65°C bis zur Gewichtskonstanz getrocknet, um anschließend die flächenbezogene Trockensubstanz jedes Humushorizontes zu ermitteln. Aus dem getrockneten Material wurden pro Humushorizont folgende Kenngrößen bestimmt:

- pH-Wert (Messung in H_2O und $CaCl_2$)
- Kohlenstoff- und Stickstoffgehalt
- Gehalt an organischer Substanz

2.3 Ergebnisse

Siehe Tabellen 2 und 3.

©Bayerische Akademie für Naturschutz und Landschaftspflege (ANL)

Foto 1

Humusprofil Geisenfeld 2.

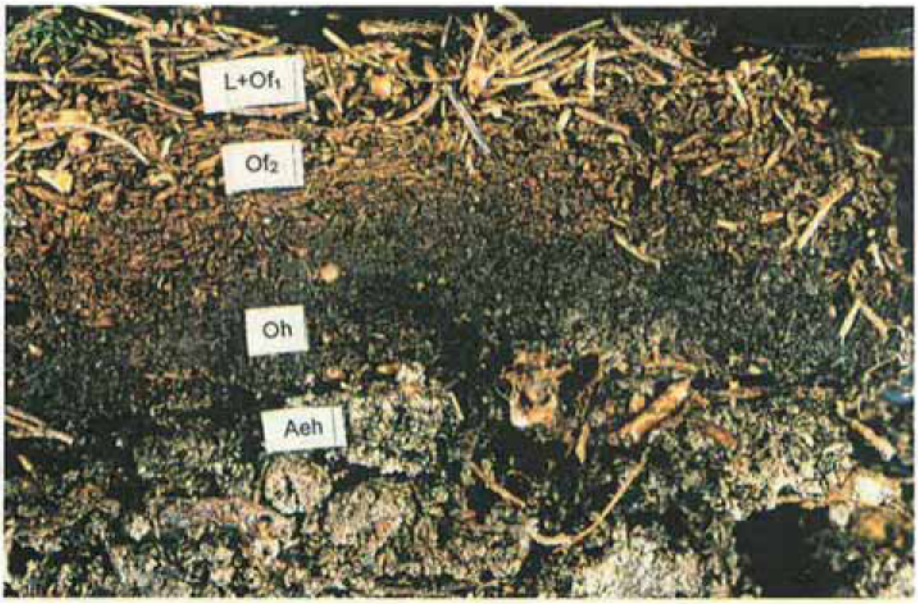


Foto 2

Humusprofil Kelheim 2.

2.4 Zusammenfassung der Ergebnisse und Interpretation

Die Mächtigkeit des Auflagehumus steigt, angefangen von einer kaum vorhandenen organischen Auflage auf Geisenfeld 2 (L-Mull), über die Flächen Freising (F-Mull), Kelheim 1 (mullartiger Moder), Geisenfeld 1 (rohhumusartiger Moder), bis zu einer mächtigen Humusauflage auf Kelheim 2 (7,2 cm - Rohhumus) an. Ebenso verhält es sich mit dem Vergleich der Trockensubstanz-Masse (Geisenfeld 2: 613 g/m^2, Kelheim 2: 8053 g/m^2).

Die Mächtigkeit des humushaltigen Mineralbodens nimmt in der gleichen Reihenfolge ab, nämlich von 10,5 cm in Geisenfeld 2 bis 1,9 cm in Kelheim 2. (vgl. Fotos 1 und 2)

Die Übergänge der Humushorizonte verlaufen in Geisenfeld 2 fließend, sie sind auf Freising, Kelheim 1, Geisenfeld 1 immer deutlicher zu sehen, auf Kelheim 2 sind sie linienhaft ausgeprägt.

Werden die fünf BDF nach der vorherrschend entwickelten Humusform von Mull zu Rohhumus geordnet, ergibt sich ein Gradient vom eutrophen Boden mit Edellaubholzbestand zum nährstoffarmen Boden mit Nadelbaumbestockung. Entlang dieses Gradienten verlangsamt sich die Geschwindigkeit der Streuzersetzung. Die ist bedingt durch:

- die Änderung der Streuqualität: Die Zersetzbarkeit der Streu nimmt in folgender Reihenfolge ab: Geisenfeld 2 (sehr schnell), Freising (mäßig), Kelheim 1 und Geisenfeld 1 (langsam bis mäßig), Kelheim 2 (langsam). Das C/N-Verhältnis des Oh steigt entsprechend von 23 (Kelheim 1) über 27 (Geisenfeld 1) auf 30 (Kelheim 2).

  Laubbäume (Geisenfeld 2, Freising) liefern eine leichter zersetzbare Streu als Nadelbäume, da Laubblätter ein günstigeres Verhältnis aus leicht- (Proteine, Stärke) bzw. schwerabbaubaren (Lignine, Wachse, Gerbstoffe) Substanzen bieten als Na-

©Bayerische Akademie für Naturschutz und Landschaftspflege (ANL)

delstreu. Außerdem wirkt die basenreichere Laubstreu (als Resultat des Baumes als „Basenpumpe") zersetzungsfördernd; aus dem Mineralboden stammendes Ca und Mg wird in den Blättern eingelagert, gelangt mit dem nächsten Streufall in die Humusauflage und bereichert diese.

- die Änderung der bodenchemischen Verhältnisse: Der pH-Wert ($CaCl_2$) sinkt im Mineralboden (Ah 0-5) von 4,3 (Geisenfeld 2) über 3,8 (Freising), 3,4 (Kelheim 1), 3,1 (Geisenfeld 1) auf 3,0 (Kelheim 2). Das C/N-Verhältnis steigt im humushaltigen Mineralboden von 11 (Geisenfeld 2) über 17 (Freising), 21 (Kelheim 1), 23 (Geisenfeld 1) auf 24 (Kehlheim 2).
- die Änderung der Zusammensetzung und der Aktivität der Bodenfauna (siehe Kap. 3). Die vor allem für die Makrofauna günstigeren Lebensbedingungen im Mullboden bedingen eine stärkere Aktivität (erkennbar an undeutlicheren Übergängen zwischen den Horizonten) in diesem Humuskörper, so daß eine intensivere Einarbeitung der Streuauflage in den Mineralboden und eine Durchmischung der Humushorizonte gewährleistet ist (Bioturbation). Diese Ergebnisse können bei der Untersuchung der Regenwurmfauna bestätigt werden (siehe 3.1). In Moder- und Rohhumusböden, also Böden mit mächtigerem Auflagehumus, ist die bodenfaunistische Aktivität vor allem auf die Mesofauna zurückzuführen (siehe 3.3).

Mit den fünf BDF wurden Böden vorgestellt, die ein breites Spektrum der Humusformen abdecken, vom tiefgründig humosen L-Mull mit nahezu fehlender Streuauflage (Geisenfeld 2) bis zum mächtigen Rohhumus mit geringmächtigem Mineralbodenhumus (Kelheim 2). Entlang eines Gradienten vom nährstoffreichen zum nährstoffarmen Boden (s. Tab. 4, Abb. 1) wird der Humus vom Mineralboden in die Auflage verlagert. Im Mineralboden ist er gut zersetzt, mit dem Bodensubstrat eng vermischt und seine Nährstoffe sind in pflanzenverfügbarer Form im Wurzelraum gespeichert. Im Auflagehumus ist die Zersetzung dagegen gehemmt; es bilden sich Lagen aus dem Rückstand der Streu früherer Jahren aus (Of- und Oh-Lagen). Die Nährstoffe sind hier in schwer abzubauender Form festgelegt, so daß sie den Pflanzen nicht zur Verfügung stehen.

Die Humusform beeinflußt somit maßgeblich die Bodenfruchtbarkeit. Die Charakterisierung des Humus ist daher Voraussetzung zur ökologischen Beurteilung eines Standortes.

3. Bodenfauna (Regenwürmer, Springschwänze)

Belebte und unbelebte Materie treffen im Humuskörper, der obersten Schicht des Bodens, aufeinander. Er ist Ort des Ab- und Umbaus der organischen Substanz und Lebensraum der Bodenfauna. Bodenfauna und Ausprägung des Humuskörpers stehen unter ständigem, gegenseitigem Einfluß.

Einerseits gestaltet die Bodenfauna den Humuskörper: Die mechanische Zerkleinerung des abgestorbenen, organischen Materials und die Vorbereitung für die weitere Zersetzung erfolgt hauptsächlich durch die saprophagen, also sich von organischem Abfall (Detritus) ernährenden Tiere, wie Regenwürmer, Schnecken, Asseln, Tausendfüßler (Makrofauna, ein bis mehrere cm Köpergröße) sowie Milben, Springschwänze, Enchytraeiden u.a. (Mesofauna, etwa 100 µm bis 1 cm).

Die Makrofauna durchmischt aktiv den Auflagehumus unterschiedlicher Stadien der Zersetzung und vermischt ihn mit dem Mineralboden (Bioturbation). Bei der Fraßtätigkeit der Bodentiere wird das Substrat zerkleinert, gleichmäßig angefeuchtet und vermischt. Das Wasserbindevermögen wird dabei erhöht und eine Oberflächenvergrößerung um den Faktor 103 bis 104 erreicht. Die Streu wird dadurch für den mikrobiellen Angriff aufgeschlossen und gleichzeitig günstige Milieubedingungen für Mikroorganismen geschaffen (Initialfunktion). An der Stoffumwandlung (Mineralisation und Humifizierung, siehe. 2.2.1) wirken vor allem die Mikrofauna (Einzeller, Nematoden u.a. bis etwa 100 µm) und Mikroorganismen (Bakterien, Pilze) mit.

Andererseits bestimmen Boden und Humuskörper die Rahmenbedingungen für das Leben der Bodenfauna: Bodenart, pH-Wert, Basensättigung, Durchlüftung, Feuchtigkeit, Stickstoff- und Phosphorangebot sowie Streuqualität sind die Faktoren, von denen das Artvorkommen, die Aktivität und die Ausprägung der Population abhängen.

Je enger der Toleranzbereich gegenüber diesen Umweltfaktoren ist, um so eindeutiger kann über das Vorkommen entsprechender Tierarten auf die Ausprägung dieser Faktoren geschlossen werden und um so besser eignen sie sich als Bioindikatoren für den Humuszustand.

Im Gegensatz zu einer chemischen oder physikalischen Charakterisierung des Bodenstandorts, bei der einzelne Faktoren zu einem bestimmten Zeitpunkt erfaßt werden, kennzeichnen die Bioindikatoren Faktorenkomplexe: Bestimmte, über einen gewissen Zeitraum einwirkende Umweltfaktoren werden durch das Vorkommen einer typisch ausgeprägten Population widergespiegelt.

Regenwürmer (*Lumbricidae*, Bodenmakrofauna) und Springschwänze (*Collembolae*, Bodenmesofauna) sind Tiergruppen, anhand derer bestimmte Umweltbedingungen im Boden (Humuskörper) charakterisiert werden können. Sie ergänzen sich in ihrem Lebensraum: Regenwürmer besiedeln vor allem eutrophe Böden mit Mullhumus, während Springschwänze auch auf ärmeren Böden mit Moder- bis Rohhumusauflagen häufig vorkommen.

©Bayerische Akademie für Naturschutz und Landschaftspflege (ANL)

Tabelle 4

Ausprägung der Eigenschaften des Humuskörpers dargestellt entlang eines Gradienten vom nährstoffreichen zum nährstoffarmen Boden.

nährstoffreicher Boden	***Humusmerkmale***	nährstoffarmer Boden
	Bioturbation	
hoch		gering
	Streuzersetzung	
schnell		langsam
	Ausprägung der Humusauflage	
kaum vorhanden, geringmächtig		mehrere cm mächtig, geschichtet
	Menge Trockensubstanz	
gering		hoch
	Ausprägung des humushaltigen Mineralbodens	
tiefgründig, dunkel, krümelig		hell, gebleicht, dicht bis sandig
	Übergang zwischen den Horizonten	
fließend		scharf, linienhaft
	Säurecharakter	
gering		hoch
	C/N-Verhältnis	
niedrig		hoch

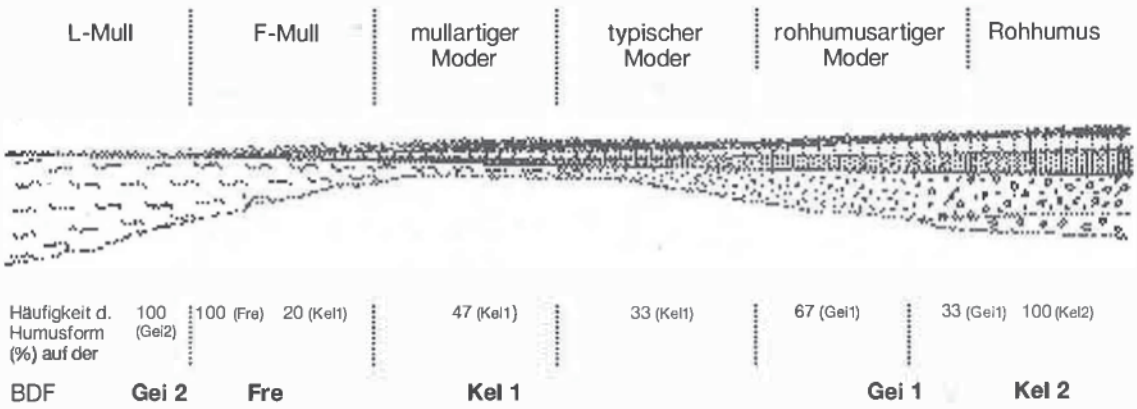


Abbildung 1

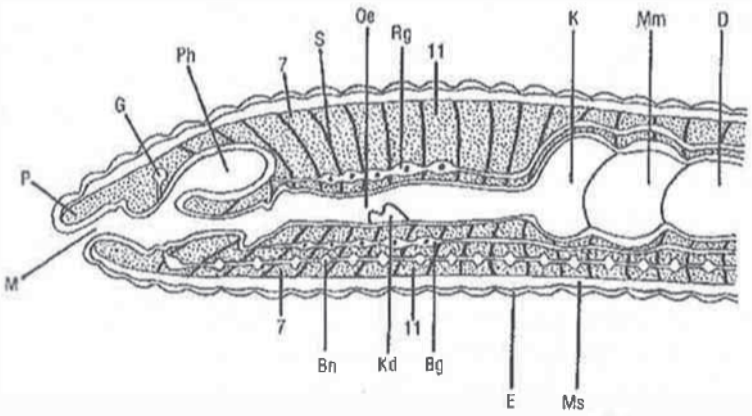
Bereich der Humusausprägungen der beprobten BDF, dargestellt an einem theoretischen Humusprofil mit Gradient vom nährstoffreichen zum nährstoffarmen Boden (nach AK Standortkartierung 1996, verändert). Zu lesen in Verbindung mit der vorhergehenden Tabelle.

©Bayerische Akademie für Naturschutz und Landschaftspflege (ANL)

Abbildung 2

Längsschnitt durch das Vorderende eines Regenwurms

Abkürzungen:
Bg bzw. Rg = Bauch- bzw. Rückengefäß mit Eintrittsstellen des Blutes in die Herzen, Bn=Bauchnervenstrang, D=Dünndarm, E=Epidermis, G=Gehirn, K=Kropf, Kd=Kalkdrüsen, M=Mund, Mm=Muskelmagen, Ms=Muskelschichten, Oe=Oesophagus (Speiseröhre), P=Prostomium (Kopflappen), Ph=Pharynx (Schlund), Septum, 7,11=Segmente
[aus MEINHARDT 1986, leicht verändert].



Die Population von Regenwürmern und Springschwänzen wurde auf unterschiedlichen Standorten der Waldboden-Dauerbeobachtungsflächen untersucht. Durch den Vérgleich der Standortsbedingungen der Probeflächen mit dem Erscheinungsbild der jeweiligen Population sowie durch den Vergleich der Population von Regenwürmern und Springschwänzen auf derselben Fläche wird die Eignung dieser beiden Tiergruppen als Indikatoren für Umweltfaktoren im Boden erläutert.

3.1 Untersuchung der Regenwurmfauna

Regenwürmer (Lumbricidae) gehören zur Klasse der Gürtelwürmer (Clitellata) des Stammes der Ringelwürmer (Annelida). Typisch für die Vertreter dieses Tierstamms ist die, auch bei Regenwürmern ausgeprägte Kammerung des Körpers in einzelne Segmente. Bestimmte Organe wiederholen sich in jedem Segment, wie z.B. Nervenganglion, primitive Niere, Dorsalporus. Andere Organe, wie Cerebralganglion (Gehirn), Kalkdrüsen und Magen sind nur im Vorderteil des Regenwurms vorhanden (s. Abb. 2).

3.1.1 Lebensweise der Regenwürmer und Bedeutung für die Eigenschaften des Bodens

Regenwürmer (*Lumbricidae*) lassen sich in drei Lebensformtypen gliedern (BOUCHÉ, 1972; DUNGER, 1983):

Epigäische Arten (Streuformen) leben in Auflagehumus und angrenzendem Mineralboden oder in anderen Anhäufungen abgestorbener, organischer Substanz, von der sie sich ernähren. In Anpassung an ihren Lebensraum sind sie dunkel pigmentiert und tolerieren einen pH-Wert ihres Milieus von bis zu 3,5 (z.B. *Dendrobaena-*, *Dendrodrilus*-Arten).

Endogäische Arten (Mineralbodenformen) leben im Mineralboden bis 50 cm Tiefe. Sie kommen häufig nur an die Bodenoberfläche, um Kot abzulegen. Mit dem Fressen von meist schon stärker zersetztem organischen Material nehmen sie große Mengen an Mineralboden auf und fördern so die Durchmischung des Mineralbodens mit organischer Substanz sowie die Bildung von stabilen Ton-Humus-Komplexen. Sie sind schwach pigmentiert oder pigmentlos, da sie sich selten an der Oberfläche aufhalten und kommen in schwach sauren bis neutralen Böden vor (z.B. *Aporrectodea-*, *Octolasion*-Arten).

Intermediäre Arten, wie *Lumbricus rubellus*, nehmen eine Zwischenstellung ein. Sie sind pigmentiert und mäßig säuretolerant.

Regenwürmer verbessern durch ihre Lebensweise entscheidend die chemischen und physikalischen Eigenschaften eines Bodens.

Sie nehmen mit der Nahrung (abgestorbene organische Stoffe der Humusauflage und Mikroorganismen) mineralische Stoffe des Bodens auf. Im Darm werden organische und mineralische Teilchen intensiv miteinander vermischt (Ton-Humus-Komplexe) und die unverdauten Reste als Losung ausgeschieden. Die organischen Stoffe der Kotballen sind für die Bodenmikroflora leicht zugänglich und regen ihre Aktivität und damit die weitere Aufspaltung der organischen Moleküle und Freisetzung von Nährstoffen an (DUNGER, 1983). Aufgrund ihrer hohen Sorptionskapazität verhindern Ton-Humus-Komplexe das Auswaschen dieser Nährstoffe, halten sie aber gleichzeitig für Pflanzen verfügbar. Die Regenwurmlosung ist also mit Nährstoffen angereichert und spielt somit für die Bodenfruchtbarkeit eine bedeutende Rolle.

Die Kotballen sind mechanisch stabiler als das sie umgebende Substrat, so daß Lumbriciden durch ihre Losungsproduktion unter günstigen Lebensbedingungen entscheidend zur Bildung des Bodengefüges beitragen (Krümel-, Wurmlosungsgefüge; REHFUESS, 1990).

Durch ihre grabende Aktivität und das Umschichten von Bodensubstanz lockern die Tiere den Boden. Sie legen Gänge an, erhöhen so den Anteil der Grobporen und verbessern Durchlüftung und Sickereigenschaften des Bodens (LEE, 1985). Zur Stabilisierung tapezieren sie die Gänge mit Losung aus, welche dadurch auch in humus- und nährstoffärmere Bodenbereiche, zum Teil in größere Tiefe verfrachtet wird. Dort profitieren Pflanzenwurzeln von ihrem Nährstoffreichtum.

©Bayerische Akademie für Naturschutz und Landschaftspflege (ANL)

Regenwürmer stellen eine wichtige, den Humuskörper aktiv gestaltende und bodenbeeinflussende Tiergruppe dar: Sie bauen fressend und grabend die Streu ab, arbeiten sie in den Boden ein und durchmischen das organische Material im Boden (LEE, 1985; s.a. SCHÖPKE, 1992). Sie wandeln die im Auflagehumus festgehaltenen Nährstoffe in eine pflanzenverfügbare Form um und verbessern somit die Bodenfruchtbarkeit. Sie „stören" die Bodenhorizonte durch die räumliche Trennung von Nahrungsaufnahme (Humuskörper) und Kotabgabe (Bodenoberfläche oder Röhrenwände im Bodeninneren) sowie das Anlegen von Gängen. Sie reichern tiefergelegene Straten im Wurzelbereich der Pflanzen mit Humus und Nährstoffen an. Diese Durchmischung oder Bioturbation ist das entscheidende Merkmal für einen regenwurmreichen Boden und führt im Idealfall zu einem homogenen, tiefgründigen Mineralbodenhumus.

Allerdings leben Regenwürmer in enger Verbindung zur Bodenlösung und werden von deren Eigenschaften stark beeinflußt. Da die Beziehung zu einzelnen Umweltfaktoren (physiologische Ökologie, Autökologie), wie Bodenreaktion, Feuchtigkeit, Temperatur, sowie die Lebensform und der Ernährungstyp bekannt sind und sie außerdem ein überschaubares, leicht bestimmbares Artenspektrum aufweisen (DUNGER 1983), sind Regenwürmer als Bioindikatoren gut geeignet.

3.1.2 Methode

Auf jeder BDF wurden 15 Proben genommen, wobei die Auswahl der Probepunkte sich an den Probepunkten der Humusuntersuchung orientierte. Die Vorgehensweise ist bei Schubert et al. (1995) nachzulesen.

Die Arten wurden nach WILCKE (1967) bestimmt. Außerdem wurde die Abundanz jeder Art sowie die gesamte Biomasse der Individuen einer Art für jeden Probepunkt festgehalten. Diese Werte wurden über die 15 Probenahmen gemittelt und auf den Quadratmeter hochgerechnet.

Tabelle 5

Artenzahl der Lumbriciden auf den BDF.

Artenzahl	Gei 2	Fs	Kel 1	Gei 1	Kel 2
epigäisch	2	3	2	1	1
intermediär	1	1	1	1	-
endogäisch	4	2	-	-	-
Gesamt	7	6	3	2	1
% d. Artenzahl in Deutschland	18	15	8	5	3

Tabelle 6

Abundanz der Lumbriciden auf den BDF.

Abundanz (In d./m²)	Gei 2	Fs Nov. '96	Fs Mai '97	Kel 1	Gei 1	Kel 2
D. octaedra	2,5	3,1	4,0	5,0	1,3	0,8
L. rubellus	10, 5	(juv.)	-	5,9	0,4	-
Dd. rubidus	0,4	1,8	0,5	0,4	-	-
D. attemsi	-	151	77	-	-	-
A. rosea	13, 0	1,4	0,5	-	-	-
A. caliginosa	2,9	-	0,5	-	-	-
A. handlirschi	2,1	-	-	-	-	-
O. lacteum	1,7	-	-	-	-	-
Juvenile	246	282	212	8,8	0,4	0,4
Gesamt	279	439	295	20,1	2,1	1,3

©Bayerische Akademie für Naturschutz und Landschaftspflege (ANL)

Tabelle 7

Biomasse der Lumbriciden auf den BDF.

Biomasse (g/m²)	Gei 2	Fs		Kel 1	Gei 1	Kel 2
		Nov. '96	Mai '97			
D. octae dra	0,19	0,11	0,45	0,54	0,17	0,19
L. rubellus	5,52	(juv.)	-	3,85	0,32	-
Dd. rubidus	0,04	0,12	0,03	0,04	-	-
D. attemsi	-	4,79	2,67	-	-	-
A. rosea	2,48	0,20	0,10	-	-	-
A. caliginosa	0,61	-	0,19	-	-	-
A. handlirschi	0,38	-	-	-	-	-
O. lacteum	1,17	-	-	-	-	-
Juvenile	46,29	4,57	4,62	1,76	0,01	0,03
Gesamt	56,68	9,79	8,05	6,19	0,50	0,22

3.1.3 Ergebnisse

Regenwürmer lassen sich aufgrund ihres Vorkommens auf den untersuchten BDF in drei Gruppen einteilen:

- Arten, die alle untersuchten Humusformen besiedeln,
- Arten, die im Mull- und Moderboden leben und Rohhumusformen meiden sowie
- Arten, die ausschließlich im Mullboden vorkommen.

Auf allen fünf BDF, von Mull bis Rohhumus, ist nur *Dendrobaena octaedra* vertreten. Die epigäische Art ist säuretolerant und kommt daher selbst im sauren Auflagehumus von Gei 1 (pH 3,7 imOh) und Kel 2 (pH 3,5 imOh) zurecht. Im Boden mit mullartigem Moder (Kel 1) ist die Besiedelung am höchsten.

Lumbricus rubellus kann auf den Flächen mit Mull und mullartigem Moder (Gei 2, Fre, Kel 1) und, in sehr geringer Dichte, im Boden mit rohhumusartigem Moder (Gei 1) nachgewiesen werden; im Rohhumusboden (Kel 2) fehlt die intermediäre Art ganz. Das Populationsmaximum ist im L-Mullboden (Gei 2) zu verzeichnen.

Im F-Mull von Fre ist *Dendrobaena attemsi* die absolut dominierende Art, während sie auf allen anderen Flächen nicht nachgewiesen wurde. *Dendrodrilus rubidus* kommt im Mull und mullartigen Moder (Gei 2, Fre, Kel 1) in geringen Dichten vor (Fre etwas dichter besiedelt).

Aporrhectodea caliginosa und *A. rosea* leben ausschließlich in den Mullböden von Gei 2 und Fre, wobei ihr Maximum eindeutig im L-Mull (Gei 2) liegt. *A. handlirschi* und *Octolasium lacteum* können nur im L-Mull (Gei 2) nachgewiesen werden. Diese Ergebnisse verdeutlichen die geringe Säuretoleranz dieser vier endogäischen Arten.

Die Freisinger Fläche wurde im Herbst '96 und im darauffolgenden Frühjahr beprobt. Bei beiden Beprobungen konnten hohe Abundanzen festgestellt werden; auch das Artenspektrum war vergleichbar, mit der Einschränkung, daß im Herbst die Art *A. caliginosa* fehlte, im Frühjahr dagegen die Art *L. rubellus*. Im Frühjahr war die Abundanz der adulten Tiere deutlich geringer als im Herbst (ausgenommen *D. octaedra)*.

Alle ermittelten Arten sind in Mitteleuropa weit verbreitet und somit in ihrem Bestand nicht gefährdet.

3.1.4 Interpretation der Ergebnisse

Die Regenwurmfauna auf den fünf Flächen spiegelt die unterschiedlichen Lebensbedingungen im jeweiligen Humuskörper und Mineralboden der BDF wider und verdeutlichen die Abhängigkeit von den dort herrschenden physikalischen und chemischen Bedingungen. Die Regenwurmfauna verändert sich mit dem Standortsgradienten vom eutrophen zum nährstoffarmen Boden.

Der basenreiche, schwach saure Mineralboden von Geisenfeld 2 wird von allen Lebensformen, vor allem aber von den wenig säuretoleranten, endogäisch und intermediär lebenden Arten, als Lebensraum beansprucht. Die leicht zersetzbare Streu wird von ihnen schnell zerkleinert und in den Mineralboden eingearbeitet. Die Aktivität (Abundanz, Biomasse) der Tiere ist sehr hoch und die Durchmischung von Streuauflage und Mineralboden (Bioturbation) somit sehr intensiv. Die hohe Individuenzahl Juveniler auf den Flächen Geisenfeld 2 und Freising verdeutlicht die guten Lebensbedingungen der Lumbriciden, die einen mächtigen L-Mull (F-Mull bei Fre) zur Folge haben.

©Bayerische Akademie für Naturschutz und Landschaftspflege (ANL)

Auf den saureren Böden von Kel 1 und Gei 1 (Basensättigung des Mineralbodens unter 50%) sind nur noch epigäische und intermediäre, also säuretolerante Arten aktiv, endogäische fehlen. Der Rückgang von Artenzahl, Individuendichte, Biomasse und juveniler Stadien verdeutlicht die für die meisten Arten ungünstigeren Lebensbedingungen (ausgenommen *D. octaedra*). Die Streu ist wesentlich schlechter zersetzbar, nur noch ein Teil wird zerkleinert und in den Mineralboden eingearbeitet, folglich wird die Humusauflage mächtiger, es bilden sich Of- und Oh-Lagen.

Der stark saure, ausgebleichte und nährstoffarme Mineralboden von Kelheim 2 wird nicht besiedelt. Ausschließlich in der Streuauflage kommt, als einzige Lumbricidenart, die säuretolerante *D. octaedra* in sehr geringer Individuendichte vor. Die Streu ist sehr schwer zersetzbar und wird daher kaum direkt zerkleinert, daher ist die Humusauflage entsprechend mächtig und geschichtet (L, Of, Oh); die Bioturbation ist vernachlässigbar. Die ungünstigen Lebensbedingungen werden durch den geringen Anteil der juvenilen Tiere verdeutlicht.

Diese Untersuchung demonstriert den Einfluß der Bodenfauna, in diesem Fall der Lumbriciden, auf Humusform und Mineralboden. Bei einer dichten Besiedlung des Bodens durch Regenwürmer wird die gesamte Streuauflage in den Mineralboden eingearbeitet. Die Bioturbation ist sehr hoch, und vor allem die Mineralbodenformen sorgen für eine gleichmäßige Einarbeitung der organischen Feinsubstanz in tiefere Bodenhorizonte. Wird der Boden durch ungünstigere Lebensbedingungen (saureres Bodenmilieu, schlechtere Nahrungsverhältnisse) schwächer und hauptsächlich durch Streu- und intermediäre Formen besiedelt, dann wird die Streuauflage langsamer umgesetzt und eingearbeitet. Folglich ist der Ah wesentlich geringmächtiger, die Streuauflage dafür mächtiger. Entsprechend dieser Besiedlungsstrukturen wird der Humus bei eutrophen Böden mit hoher Bioturbation hauptsächlich im Mineralboden, bei nährstoffarmen Böden mit geringer Bioturbation vorwiegend in der Humusauflage festgelegt.

Durch das Auftreten bzw. Vorherrschen bestimmter Lebensformtypen kann auf die Bedingungen geschlossen werden, die in dem jeweiligen Boden anzutreffen sind (z.B. pH-Wert, Basenpotential etc.). Somit ergänzen sich die Untersuchungen am Humuskörper und an der Regenwurmfauna gut; sie tragen dazu bei, Umwelteinflüsse auf den Boden zu verdeutlichen. Die Familie der Lumbriciden umfaßt eine überschaubares, gut bestimmbares Artenspektrum. Durch ihren engen Kontakt mit dem Boden und der Bodenlösung sind sie als Bioindikatoren für die vorhandenen Umweltfaktoren in den Böden, die sie besiedeln (also vor allem Mull- und Moder-Böden), und somit auch für die Bodendauerbeobachtung gut geeignet.

3.2 Untersuchung der Springschwanzfauna

3.2.1 Bedeutung der Springschwänze für die Eigenschaften des Bodens

Die Springschwänze (*Collembola*) werden als Urinsekten (Apterygota) (Abb.4) neben Rädertieren (Rotatorien), Fadenwürmern (Nematoden), Klein-Ringelwürmern (Enchytraeiden), Bärtierchen (Tardigraden), Milben (Acarina), und anderen Urinsekten (Proturen und Dipluren) zur Mesofauna gezählt. Die Nahrungsgrundlage der bodenlebenden, sapro- bzw. humiphagen Springschwänze bildet die Mikroflora zusammen mit dem von ihr besiedelten organischen Substrat. Die Mesofauna setzt zusammen mit der Makro-(z.B. Regenwürmer, Diplopoden und Enchytraeiden) und Megafauna (Wirbeltiere) die Streu um und initiiert dadurch die Umsetzungsprozesse (Mineralisation und Humifikation) im Boden. Collembolen besiedeln das Porensystem im Boden in großer Zahl, sie sind aber nicht grabfähig, gestalten ihre Umwelt also nicht aktiv im Sinne einer hohen Bioturbation wie etwa die Regenwürmer. Aufgrund ihrer hohen Individuenzahlen tragen sie aber wichtige bodenbiologische Steuerfunktionen.

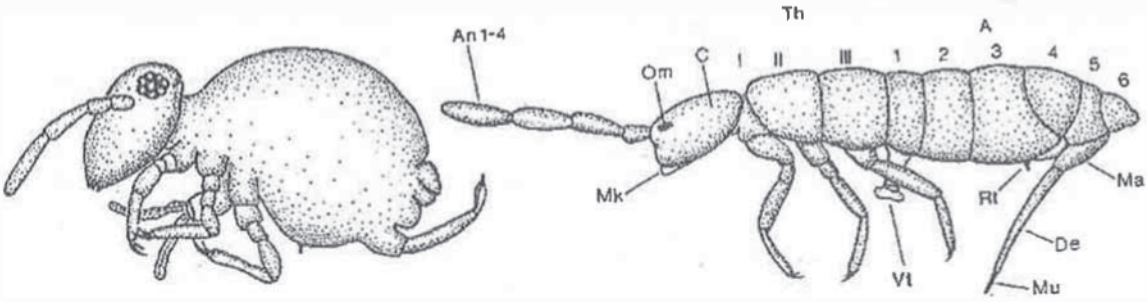


Abbildung 3

Habitus und Bau der Grundtypen von Collembolen: links Typ „Kugelspringer" (Symphepleona) und rechts Typ „Erd- bzw. Gletscherfloh" (Arthropleona).

Abkürzungen: A - Abdominalsegmente 1-6, An - Antenne, C - Kopf, De - Dens, Ma - Manubrium, Mu - Mucro (De, Ma und Mu bilden zusammen die Sprunggabel), Mk - Mundkegel, Om - Augenfleck (bis zu 8 Ommatidien), Rt - Retinaculum, Th - Thorax I-III, Vt - Ventratubus [n. EISENBEIS & WICHARD 1985, leicht verändert].

©Bayerische Akademie für Naturschutz und Landschaftspflege (ANL)

Sie transportieren Sporen in großer Zahl zu Orten günstiger Keimungsbedingungen. Darüber hinaus steigern und steuern sie bei der Sekundärzersetzung durch Beweidung der Mikrobenpopulationen deren Leistung (selektiver Fraß von Collembolen z.B. SHAW 1988, THIELE 1990; Beweidungseffekt z.B. ANDERSON & INESON 1983, DUNGER 1983).

Collembolen sind weltweit verbreitet. Sie haben sich an die extremsten Klimabedingungen angepaßt und besiedeln alle terrestrischen Ökosysteme. In unseren Breiten finden wir sie von Strandgesellschaften der planaren Stufe bis in die obere nivale Stufe der Alpen. Ihr Optimum erreichen sie jedoch in Wäldern. Dort entfalten sie sich am besten unter sauren bis sehr stark sauren Standortsbedingungen. Entlang des Standortsgradienten von eutrophen Böden mit Mull-Edellaubmischwäldern zu Coniferenbeständen auf armen Böden mit Rohhumusauflagen, nimmt die Abundanz der Makrofauna ab, die Abundanz der Mesofauna zu (DUNGER 1983). Die Collembolen erreichen in Mitteleuropa Abundanzen bis zu 100.000 Individuen/m^2 in nordischen Wäldern mit stark entwickelter Rohhumusauflage bis zu 700.000 Individuen/m^2 (DUNGER, 1983).

Eignung von Collembolen als Bioindikatoren

Die von DUNGER (1982) formulierten Idealanforderungen an Bodenbioindikatoren werden von Collembolen voll erfüllt. So sind ihre aktiven Stadien gut erfassbar (z.B. Extraktionsmethode nach Macfadyen 1961), ihre Reaktionsfähigkeit auf Umweltnoxen ist dank günstigen Voltinismus (z.B. ZERLING 1990, HERGARTEN 1984, DUNGER 1979, 1983) hoch. Collembolen lassen sich u.a. in edaphische (GISIN 1960) und trophische Lebensformtypen (z. B. WOLTER 1963, DUNGER 1983) differenzieren. Wichtig ist auch die enge Korrelation der Collembolen mit der mikrobiologischen Gesamtaktivität (DUNGER 1983).

3.2.2 Methode

Die Probenahme erfolgte im Frühjahr und im Herbst. Dabei wurden jeweils 5 Proben mit einem 5-cm-Bohrer stammfern in repäsentativen Bereichen der BDF genommen. Die organische Auflage wurde in Subhorizonte, der humose Mineralboden in Tiefenstufen getrennt und aus diesen Teilproben die Bodenfauna mit einem Trockenextraktor ausgetrieben. Mit dieser Methode werden hauptsächlich die bodenlebenden (hemiedaphischen und euedaphischen) Collembolen, weniger die epedaphischen Formen erfaßt. Arten des letzteren Lebensformtyps (z.B. *Tomocerus minor*) sowie Arten, deren Hauptlebensraum nicht der Boden ist (z.B. *Entomobrya corticalis*) wurden daher bei der vergleichenden Betrachtung der BDF ausgeschlossen. Auch seltene bodenlebende Spezies (Arten mit einer Frequenz von weniger als 40% auf nur einer BDF) wurden zum Vergleich nicht herangezogen, um eine Beeinflussung der Ergebnisse durch mögliche Zufallsfunde auszuschließen (Tab. 8). Eine Beschränkung auf die häufigen Hauptarten ist bei Untersuchungen mit relativ kleiner Stichprobe üblich (SCHICK 1995), hat aber den Nachteil, daß die selteneren, stärker eingenischten Arten als Indikatoren wegfallen.

Die Schätzung der Collembolen-Biomasse sowie des Sauerstoffverbrauchs von Collembolen und Regenwürmern basiert auf Daten aus DUNGER (1983) und BRUCKER (1990).

3.2.3 Ergebnisse

Arten- und Individuenzahlen

Die Abundanz und Artenzahl der Collembolen der untersuchten BDF variierte ohne erkennbare Standortabhängigkeit. Die höchsten Abundanzen wurden bei den Standortextremen (Gei 2, Kel 2) gefunden. Die Artenzahl lag im Moderbuchenwald am höchsten.

Collembolenarten

Auf den 5 untersuchten Flächen wurden insgesamt 79 Collembolentaxa gefunden. Für den Flächenvergleich werden jedoch aus o.g. Gründen (siehe Methode) nur 36 Arten herangezogen. Die Übersicht in Tab. 9 zeigt, daß sich die Collembolen bezüglich ihrer Verbreitung auf den untersuchten Standorten in 3 Gruppen einteilen lassen:

1. Arten, die ausschließlich bzw. bevorzugt Mineralboden-Humusformen besiedeln,
2. Arten die alle Humusformen besiedeln,
3. Arten, die ausschließlich bzw. bevorzugt Auflage-Humusformen besiedeln.

Tabelle 8

Abundanz, Artenzahl (gesamt) und Zahl von Arten mit einer Abundanz > 300 Individuen pro m^2 und einer Frequenz von mindestens 40% auf mindestens einer BDF.

BDF	Gei 2		Fre		Kel 1		Gei 1		Kel 2	
Termin	Her	Frü	Her	Frü	Her	Frü	Her	Frü	Her	Frü
Individuen/m^2	73276	168309	56561	42803	57682	70242	41071	31219	105275	105872
Artenzahl	22	23	26	26	25	19	17	20	25	21
Arten (f >40%)	17	20	22	22	18	18	17	14	21	17

©Bayerische Akademie für Naturschutz und Landschaftspflege (ANL)

Tabelle 9

Collembolenarten mit einer Abundanz > 300 Individuen pro m2 und einer Frequenz von mindestens 40 % auf mindestens 1 BDF.

	Gei 2		Fre		Kel 1		Gei 1		Kel 2	
Art	Her	Frü	Her	Frü	Her	Frü	Her	Frü	Her	Frü
Onychiurus furcifer	204	4242								
Odontella armata	2752	1188								
Hypogastrura scotica		2206								
Sminthurinus flameolus	408									
Hypogastrura denticulat	510									
Tomocerus minutus		339								
Neelus minutus		509	102							
Folsomia multiseta			12026	4178						
Arrhopalites secundarius			510	204						
Folsomia quadrioculata	6115	10010	6828	8153	23440	6617	204			
Onychiurus subuligunatus	9172	7805			204		102	509		
Sminthurides pumilis	611	1697		102				339		
Lepidocyrtus lanuginosus		848	204	1019			510			
Lepidocyrtus cyaneus	408	3393	408	102	1936	1697			306	
Neelus minimus	1019	19681	1631	510	102	1188	408	509	102	1357
M. tenuisensillata	14268	2036	408	102	408	339	2956		3363	1697
Friesea mirabilis	1733	6617	102		510				204	848
Isotoma notabilis	2446	8314	2548	2752	3057	4072	6217	3902	6930	3393
Mesaphorura sylvatica	102	170	102	306	2548	170			815	339
Onychiurus armatus	510	2884	7440	2140	1223	1357	2344		5809	2036
Mesaphorura macrochaeta	4077	6108	2854	917		6787	1223	339	2344	4411
Isotomiella minor	13962	62607	11210	7643	14573	20530	8255	12046	50956	40550
Lepidocyrtus lignorum	611	170	204	713		170	1019	679	102	1018
Mesaphorura italica		170	204	102		339			102	2375
Tomocerus mi or			204	408			611	170		
Sphyrotheca lubocki			102	102				4242		
Onychiurus pannonicus			611		204	170			306	
Willemia anophtalma			1121	408	1427	170	3159		1936	8653
Anurida pygmaea			611	102	306	848	2446	339	1631	3054
Tullbergia callipygos			917	102	611			509	12433	9332
Pseudosinella alba				306	611	679	408	509	611	1188
Anurida granulata				102		170			204	339
Neanura muscorum					204	170	1325		408	
Pseudosinella ksenemani					611				1019	
Hypogastrura sigillata					510	5260		1697	5401	3733
Onychiurus subarmatus							510			
Mesaphor urayosii							1834	170	1733	1866

©Bayerische Akademie für Naturschutz und Landschaftspflege (ANL)

Nur etwa 20% der Arten besiedelten ausschließlich die Standortextreme (Gei 2 auf der einen Gei 1 und Kel 2 auf der anderen Seite), die Arten mit breiterer Valenz sind (auch bedingt durch das Ausscheiden der seltenen Spezies) am häufigsten. Arten ohne klar erkennbaren Besiedelungsschwerpunkt waren auch aus der Literatur bekannte Ubiquisten wie *Isotoma notabilis, Isotomiella minor; Mesaphorura sylvatica, M. macrochaeta* und *Onychiurus armatus*. Diese Generalisten zählen auf den 5 untersuchten BDF zu den häufigsten Spezies.

Isotoma notabilis verhielt sich in zahlreichen Kalkungsexperimenten als basophile Art und vermehrte sich nach Kalkung stark. Ihre Verbreitung auf den BDF gibt jedoch keinen Hinweis auf eine Präferenz für basenreiche Standorte.

Jedoch weisen einige Arten innerhalb dieser weniger spezialisierten Gruppe deutliche Verbreitungsschwerpunkte auf. *Lepidocyrtus cyaneus, Neelus minimus* und *Frisea mirabilis* erreichten auf den günstigeren Standorten die höchsten Abundanzen. *Lepidocyrtus lignorum* war in Gei 1, *Mesaphorura italica* auf Kel 2 am häufigsten.

Arten basenreicherer Böden mit höherer biologischer Aktivität sind in Tab. 9 (links) oben gruppiert. Die ersten 8 in Tab. 9 aufgelisteten Spezies besiedelten nur Mull-Böden. Die Besiedelung der folgenden 5 Arten reicht bereits in Moder und Rohhumus hinein, das Optimum liegt jedoch im Bereich günstigerer Humusformen. Die als basophile Zeigerart geltende *Isotoma notabilis* wies dagegen keine entsprechenden Präferenzen auf. Dies steht aber mit anderen Autoren im Einklang, welche sie als Ubiquist bezeichnen. *Isotoma notabilis* ist ein gutes Beispiel für die scheinbar widersprüchliche Reaktion von Bodenarthropoden auf die Änderung des Säurestatus. Dies hat verschieden Ursachen. Im Gegensatz zu den Tiergruppen der Bodenlösungsfauna (Anneliden, Nematoden, Tardigraden, Protozoen) sind Bodenarthropoden dank ihrer hydrophoben Cuticula kaum einem direkten Säurestress ausgesetzt. Säureeffekte wirken also indirekt über eine Verschiebung der Umweltbedingungen vermutlich v. a. über Veränderung der Konkurrenz (HAGVAR 1987) und des Nahrungsangebots. Möglicherweise geht die vermeintliche Basophilie von *I. notabilis* darauf zurück, daß sie sich besonders schnell neuen Lebenbedingungen anpassen kann (DUNGER 1968) und damit die typischen Eigenschaften des r-Strategen besitzt, aber die einmal besetzte Nische auch dauerhaft halten kann (K-Stratege). Denn Kalkungen gehen üblicherweise mit einer radikalen Umstellung der Bodenlebewelt einher (MAKESCHIN 1991, MELLERT 1992, HAGVAR 1984, SCHEIDLER 1994) und damit kommt *I. notabilis* eben besonders gut zurecht.

Als einzige Art deutlich acidophob erwies sich *Folsomia quadrioculata*. Sie bevorzugt moderate Verhältnisse (ZERLING 1990) und kommt auch auf den BDF in Mull- und Moderböden häufig vor. Im rohhumusartigen Moder von Gei1 trat sie nur noch vereinzelt auf und fehlte schließlich im Rohhumus von Kel 2.

Arten basenarmer Böden mit geringerer biologischer Aktivität gruppieren sich in Tab. 9 (rechts) unten. Hier finden wir acidophile Arten, wie *Willemia anophtalma, Anurida pygmaea, Neanura muscorum, Mesaphorura yosii* und *Tullbergia callipygos* (in Tab. 9 nicht aufgeführt). Ihre Besiedelung folgt dem Gradient der Basenversorgung. Die höchsten Abundanzen erreichen sie in der Rohhumus-Auflage der BDF Kel 2 bzw. Gei 1. Keine dieser streng acidophilen Arten kommt im basenreichen Auenwaldboden von Gei 2 vor. Ihren „säureliebenden Charakter" bewiesen diese Arten in unterschielichen Formationen in mehreren europäischen Ländern (HAGVAR 1984, MELLERT 1992).

Im folgenden seien auch noch Arten genannt, die weder baso- noch acidophil aber bereits als Zeiger für andere Faktoren genannt wurden. Als Weiser für den frischeren Wasserhaushalt des Auwaldbodens in Gei 2 sind *Hypogastrura scotica* und *Tullbergia denisii* (nicht in Tab. aufgeführt) zu nennen. Erwähnenswert ist auch das vereinzelte Vorkommen epedaphischer bzw. krautschichtbewohnender Arten auf dieser BDF, die auf den anderen Flächen weitgehend fehlen. Interessant ist auf der BDF Fre das starke Auftreten von *F. multiseta*, neben ihrer weit verbreiteten Schwesternart *F. quadrioculata*. Nach GISIN (1960) bevozugt *F. multiseta* die wärmeren Standorte.

3.2.4 Bewertung der Ergebnisse

Eine Zunahme der Individuendichte entlang des Standortgradienten von basenreichen Mull- zu sauren Rohhumusböden bei den Collembolen, wird in der Literatur häufig beschrieben (z.B. BECK 1993, DUNGER 1983), konnte hier aber nicht festgestellt werden. Für die Collembolenpopulation unterschieden sich die Böden trophisch offenbar nur geringfügig. Dieser Befund steht im Einklang mit den doch eher geringen Basensättigungsunterschieden in der Auflage – dem Hauptlebensraum der Collembolen. Die Standortsdifferenzierung der untersuchten BDF anhand der Artenzusammensetzung der Collembolenfauna ist dennoch eindeutig. Die beiden standörtlichen Extreme Kel 2 und Gei 2 weisen entsprechend den Erwartungen die größten Unterschiede ihrer Collembolenfauna auf. Darüber hinaus lassen sich alle Moder-Standorte klar vom L-Mull-Standort Gei 2 abtrennen, und auch die Gliederung innerhalb der Moder-Standorte hin zum Rohhumus entspricht dem standörtlichen Gradienten. Diese Gruppierung der Standorte anhand der Struktur der Collembolengemeinschaften wurde auch durch Ähnlichkeitsanalysen (multivariate Verfahren und Indizes) untermauert (MELLERT 1995, unveröffentlicht).

©Bayerische Akademie für Naturschutz und Landschaftspflege (ANL)

Für die Bodendauerbeobachtung bedeutender ist jedoch eine Bioindikation der Umweltqualität anhand der Autökologie einzelner Arten oder ökologischer Artgruppen. Die bekanntermaßen acidophilen Spezies *(Willemia anophtalma, Anurida pygmaea, Neanura muscorum* und *Mesaphorura yosii)* spiegelten die Standortverhältnisse gut wider. Auch andere Arten, deren ökologische Valenz weniger bekannt ist, zeigten deutliche Verbreitungschwerpunkte. Andererseits war die Verbreitung einiger Arten entgegen anderer Befunde über das untersuchte Standortspektrum erstaunlich konstant, wie bereits am Beispiel von *I. notabilis* erläutert wurde. Auch die Gruppe der Tulbergiine, die eher als acidpophil eingestuft werden, verhielten sich vorwiegend indifferent. Diese scheinbaren Widersprüche erklären sich aus unserer – in diesem Fall auf den besonders gut untersuchten Faktor Bodenreaktion – beschränkten Sichtweise. Bodentiere müssen sich nicht nur mit dem Boden-pH, sondern mit einer Vielzahl von Faktoren (Faktorenkomplex) auseinandersetzen. In diesem Zusammenhang sei an das Gesetz der relativen Standortskonstanz aus der Pflanzensoziologie erinnert, welches besagt, daß eine Art überall dort (über-) lebt, wo sie ihre Nische vorfindet, d.h. eine ihr zuträgliche Faktorenkonstellation. Diese günstige Faktorenkonstellation könnte beispielsweise durch eine ökologische Kompensation (z.B. kann die Tiefgründigkeit des Bodens durch regelmäßigen Niederschlag ersetzt werden) oder ein Mikrohabitatwechsel (z.B. Horizontalwanderung zu geeigneten Bodenhorizonten) erreicht werden.

3.3 Regenwürmer und Springschwänze – ein Vergleich

Regenwürmer und Springschwänze unterscheiden sich deutlich in ihrem Vorkommen, in ihrer Lebensweise, ihren Reaktionen auf die Umwelt und damit auch in ihrer Aktivität in den verschieden Böden. Somit unterscheidet sich die Umsatzleistung dieser Tiergruppen je nach Bodenbedingung stark, folglich hat die Zusammensetzung der Bodenfauna ihrerseits einen entscheidenden Einfluß auf die Ausprägung der Humusform. Um diesen Zusammenhang aufzuzeigen, wird die Bedeutung beider Tiergruppen anhand des Artenspektrum, der Abundanz, der Biomasse und des Stoffumsatzes verglichen. Diese Größen sind auch bei der Auswahl von Tiergruppen zum Zwecke einer Bioindikation ausschlaggebend.

Die Kenntnis des **Artenspektrum** ist ein wichtiges Kriterium für die Auswahl der Indikatorgruppe in einem bestimmten Boden. Die Befunde auf den untersuchten BDF zum Artenspektrum von Regenwürmern und Collembolen lassen sich in Übereinstimmung mit anderen Autoren wie folgt verallgemeinern (Abb. 4):

1. Die Artenzahl der Regenwürmer ist im basenreichen Mullboden hoch und nimmt zum basenarmen Rohhumusboden stark ab.
2. Die Artenzahl der Collembolen ist innerhalb des Standortsspektrums relativ konstant. Generell ist sie wesentlich höher, als die der Regenwürmer.
3. Vom Mull zum Rohhumus verschiebt sich bei beiden Tiergruppen das Spektrum deutlich von basophilen bzw. wenig säuretoleranten zu säuretoleranten bzw. acidophilen Arten (nicht aus der Graphik erkennbar).

Die **Abundanz** ist – zusammen mit der Masse des einzelnen Tieres – eine wichtige Kenngröße für den Stoffumsatz. Die Befunde auf den untersuchten BDF zur Abundanz von Regenwürmern und Collembolen lassen sich in Übereinstimmung mit anderen Autoren wie folgt verallgemeinern (Abb. 5):

1. Die Abundanz der Regenwürmer ist im basenreichen Mullboden sehr hoch und sinkt zum basenarmen Rohhumusboden gegen Null.
2. Die Abundanz der Collembolen ist innerhalb des Standortsspektrums relativ konstant. Generell ist sie wesentlich höher, als die der Regenwürmer.

Die Gesamt-**Biomasse** einer Population gibt einen guten Anhaltspunkt für die Bedeutung verschiedener Tiergruppen in einem Ökosystem(-Kompartiment). Die Befunde zur **Biomasse** von Regenwürmern und Collembolen lassen sich wie folgt verallgemeinern (Abb. 6):

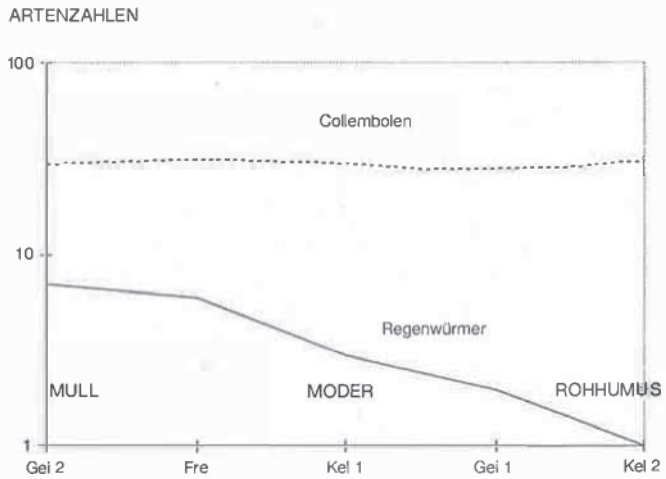


Abbildung 4

Artenzahl von Regenwürmern und Collembolen entlang des Standortgradienten von Mull zu Rohhumus.

©Bayerische Akademie für Naturschutz und Landschaftspflege (ANL)

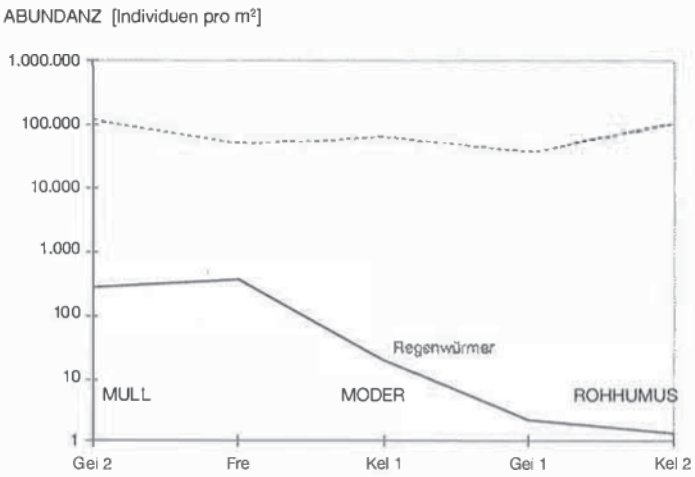


Abbildung 5

Abundanz (Individuendichte) von Regenwürmern und Collembolen entlang des Standortgradienten von Mull- zu Rohhumus-Böden.

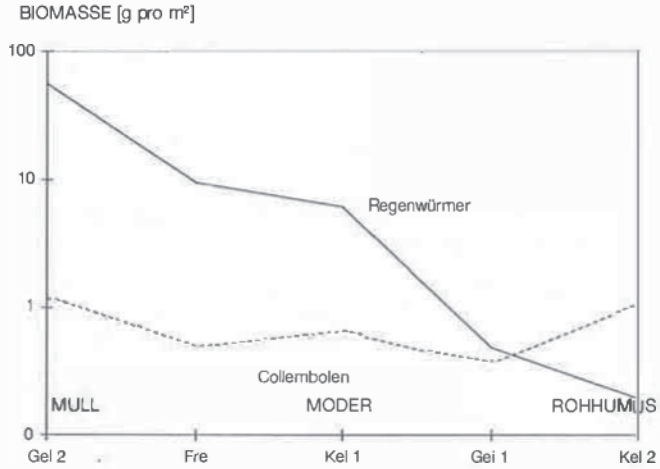


Abbildung 6

Biomasse von Regenwürmern und Collembolen entlang des Standortgradienten von Mull- zu Rohumus-Böden.

1. Die Biomasse der Regenwürmer ist im basenreichen Mullboden um Zehnerpotenzen größer als die der Collembolen. Sie sinkt bei abnehmernder Basensättigung bis zum basenarmen Rohhumusboden gegen Null, analog der Individuendichte.
2. Die Biomasse der Collembolen variiert innerhalb des Standortsspektrums nur geringfügig und ohne klare Tendenz.
3. Die gleiche Biomasse weisen beide Tiergruppen im rohhumusartigen Moderboden (mit mittelbasischem A- und basenarmem B-Horizont) auf. Im Rohhumusboden mit basenarmem A- und B-Horizont ist die Biomasse der Collembolen höher als die der Regenwürmer.

Die zentrale Frage, welche Tiergruppe den Hauptumsatz der Streu in welcher Humusform leistet, kann am besten anhand des Sauerstoffverbrauchs als Maßzahl für den **Stoffumsatz** abgeschätzt werden. Diese Schätzung wurde nach Daten von PALISSA aus BRUCKER et al. (1990) durchgeführt. Zum Vergleich der Biomassen beider Tiergruppen wurde die Biomasse der Collembolen nach Angaben von DUNGER (1983) geschätzt (0,1 g pro 10.000 Individuen).

Die Ergebnisse zum Stoffumsatz von Regenwürmern und Collembolen stellen sich auf den untersuchten Flächen wie folgt dar (Abb. 9):

1. Der Stoffumsatz der Regenwürmer ist im basenreichen Mullboden um Zehnerpotenzen größer als der der Collembolen. Er sinkt bei abnehmernder Basensättigung bis zum basenarmen Rohhumusboden gegen Null, analog zu Individuendichte und Biomasse.
2. Der Stoffumsatz der Collembolen variiert innerhalb des Standortsspektrums nur geringfügig und ohne klare Tendenz.
3. Den gleichen Stoffumsatz weisen beide Tiergruppen im Boden mit typischem Moder (mit mittelbasischem A- und B-Horizont) auf. Geht die Humusform weiter Richtung Rohhumus setzen Collembolen mehr Streu um, als Regenwürmer.

Die Zusammensetzung der Bodenfauna, die Streuumsatzgeschwindigkeit und die Humusform stehen in einer engen Beziehung zueinander:

Aktivität und Streuumsatz der Regenwürmer ist unter günstigen Bedingungen, d.h. in Mull-Böden (Gei 2, Fre) sehr hoch bis hoch und bestimmend für

©Bayerische Akademie für Naturschutz und Landschaftspflege (ANL)

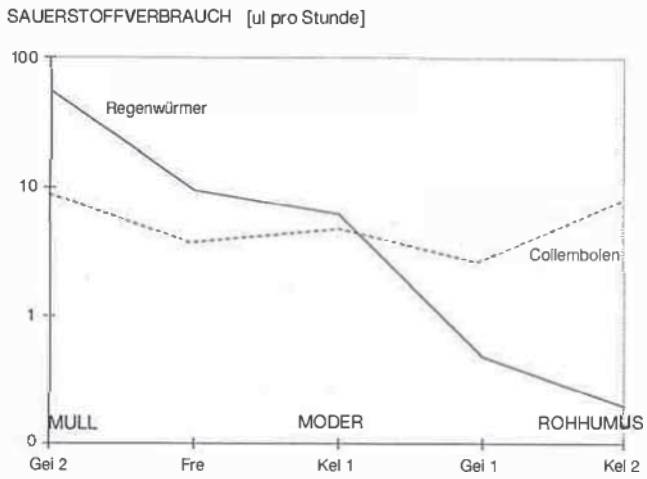


Abbildung 7

Sauerstoffverbrauch von Regenwürmern und Collembolen entlang des Standortgradienten von Mull- zu Rohumus-Böden.

die Humusform. Innerhalb eines Jahres können sie die Streu vollständig umsetzen und in den Boden einarbeiten. Bei ungünstigeren Bedingungen, d.h. auch geringerer Dichte und Aktivität der Regenwürmer, nimmt der Streuumsatz rasch ab. Der Übergang vom Regenwurm- (Mega- bzw. Makrofauna) zum Collembolen- (Mesofauna) dominierten Stoffumsatz vollzieht sich im Bereich des Moders (Kel 1). In ungünstigen Moderformen (Gei 1) und im Rohhumus (Kel 2) spielen schließlich die Gruppen der Mesofauna die Hauptrolle beim Streuumsatz. Da diese Tiergruppen jedoch nicht/kaum grabend aktiv sind, wird die Streu nicht mit dem Mineralboden vermischt; Of- und Oh-Lagen werden aus dem Rückstand der Streu früherer Jahre gebildet. Die Streu von Rohhumusböden wird in erster Linie durch die Aktivität der Mesofauna erst innerhalb mehrerer Jahrzehnte umgesetzt.

Regenwürmer und Springschwänze ergänzen sich hinsichtlich ihres Vorkommens und ihrer Bedeutung in den verschieden Böden bzw. Humusformen (Tab. 10).

Das Vorkommen von Regenwürmern ist eng an den pH-Wert bzw. die Basensättigung des Bodens gebunden. Alle Arten sind kaum bis mäßig säuretolerant und somit in den sauren Humusformen nicht bzw. kaum aktiv. Ihr Artenspektrum ist relativ gering, die Kenntnis der Autökologie dagegen sehr gut. Als Vertreter der Bodenlösungsfauna wirken chemische Veränderungen, vor allem der Bodenreaktion, direkt auf Regenwürmer.

Bei den Collembolen gibt es sowohl basophile als auch acidophile Arten, sie sind somit wesentlich toleranter gegenüber Boden-pH und Basensättigung. Diese Tiergruppe besiedelt mit einem großen Artenspektrum alle einheimischen Böden. Allerdings ist die Kenntnis ihrer Autökologie geringer. Säureeffekte wirken indirekt, durch Nahrung und Konkurrenz.

Anhand der Humusform kann rasch eine Auswahl der geeigneten Indikatorgruppe für einen bestimmten Boden getroffen werden (Tab 10). Derzeit ist die gemeinsame Untersuchung mehrerer (mindestens zweier) Tiergruppen zur Absicherung des Ergebnissen und zur Erhöhung der Aussagekraft wünschenswert.

4. Schlussfolgerungen und Ausblick

Regenwürmer und Collembolen halten zusammen mit anderen Organismen der Destruenten-Saprophagen-Gemeinschaft den Nährstoffkreislauf im Ökosystem Wald aufrecht (Abb. 8). Aufgrund ihrer Eigenschaften sind sie als komplementäre Bioindikatoren gut geeignet. Die grabenden Regenwürmer ergänzen sich mit den porenbewohnenden Spring-

Tabelle 10

Vorkommen von Regenwürmern (Rw) und Collembolen (Col) in Böden mit unterschiedlicher Humusform.

Arten- und Individuenzahl sowie Anteil am Streuumsatz: + hoch, o mittel, - gering

Humusform	C/N	C/P	pH	Umsatz-geschw. der Streu	Artenzahl		Individuenzahl		Anteil am Streuumsatz	
					Rw	Col	Rw	Col	Rw	Col
Mull	10-20	< 300	3-7 ,5	Monate	+	+	+	+	+	-
Moder	20-26	300-600	2,5-4,5	Jahre	o	+	o	+	+	+
Rohhumus	> 27	> 600	2,5-3,5	Jahrzehnte	-	+	-	+	-	+

C/N- und C/P- Verhältnisse nach REHFUESS (1990); pH-Werte nach BMELF (1997).

©Bayerische Akademie für Naturschutz und Landschaftspflege (ANL)

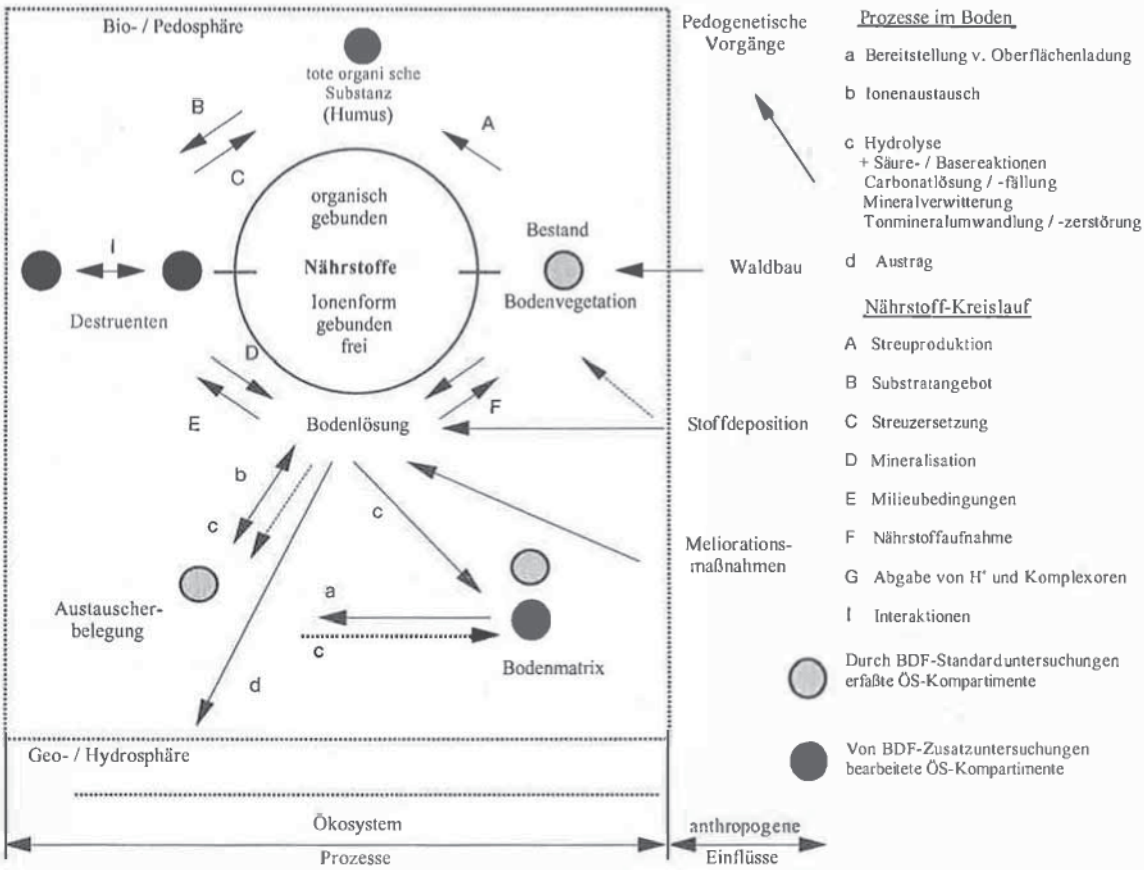


Abbildung 8

Wichtige Beziehungen zwischen den am Stoffkreislauf im Waldboden beteiligten Ökosystemkompartimente und die Eintrittspforten anthropogener Einflüsse.

schwänzen sowohl in ihrer Bedeutung in unterschiedlichen Böden als auch in ihrer Ökophysiologie und werden daher über verschiedene Wirkungspfade durch Umweltfaktoren beeinflusst (Abb. 8). Während (anthropogene) Einflüsse, z.B. die Deposition von Säuren, auf Regenwürmer als Glieder der Bodenlösungsfauna direkt über die Bodenchemie einwirken (Pfad E), werden Collembolen in erster Linie indirekt über die Änderung der Bodenbiologie (Konkurrenz und Nahrung) (Pfade B und I) beeinflußt.

Wie Abb. 8 zeigt, werden die Hauptparameter aus allen wichtigen am Stoffkreislauf beteiligten Ökosystemkompartimenten vom Arbeitsprogramm der Waldboden-Dauerbeobachtungsflächen erfaßt. Damit wird es möglich, Veränderungen der Böden zu dokumentieren und die dafür verantwortlichen Ursachen festzustellen.

Die in dieser Arbeit vorgestellten Ergebnisse der bodenzoologischen Aufnahmen zeigen exemplarisch und stellvertretend für die anderen Untersuchungen auf den Waldboden-Dauerbeobachtungsflächen die sich gegenseitig ergänzenden und weiterführenden Möglichkeiten auf. Das Zusammenführen der unterschiedlichen Informationen schafft Grundlagenwissen in Fällen, in denen noch Unsicherheiten über die Autökologie von Arten bestehen. In Fällen, in denen eine Indikation möglich ist, wird die Aussagekraft verstärkt und die Interpretationssicherheit der Ergebnisse erhöht.

Unser Wissen über standortsspezifische Bodenzoocoenosen ist aber meist noch nicht ausreichend, um aus der Bodenbiologie eines Standorts klare Aussagen über eine Beeinträchtigung des Bodens/Bodenlebens machen zu können, vorallem wenn keine starken Beeinträchtigungen vorliegen. An entsprechenden Grundlagen und Instrumenten wird aber intensiv gearbeitet. RÖMBKE et al. (1997) stellten ein regional differenziertes **B**odenbiologisches **S**tandorts-**K**lassifikations-System (BBSK-Konzepts) für Baden-Württemberg vor. Dabei wird aus dem Vergleich eines Erwartungswertes für die standortstypische Bodenfauna mit dem Istwert die Beeinträchtigung eines Standorts abgeleitet. Auch DUNGER (1998) hält diese Methode gegenwärtig für das beste Instrument, um zu einer biologischen Beurteilung von Böden zu kommen. Ein wesentlicher Vorteil des Verfahrens ist, daß der zugrundegelegte Sollwert (die standortstypische Bodenfauna) nicht durch eine lückenlose Kenntnis der Autökologie sämtlicher Arten untermauert sein muß. Andererseits ist die Verwendung der standortstypischen Bodenfauna nur im regionalen Maßstab möglich, weil eine Abweichungen von der „Norm-Fauna" ohne die genaue Kenntnis der

©Bayerische Akademie für Naturschutz und Landschaftspflege (ANL)

Verbreitung der betrachteten Arten nicht auf eine (anthropogene) Beeinträchtigung zurückgeführt werden kann. Die Ausscheidung der standortstypische Bodenfauna muß daher regional erfolgen und sollte möglichst die Wuchsgebietsgliederung berücksichtigen, da Arealgrenzen in der Regel naturäumlichen Grenzen folgen. Die Erkenntnisse aus der vorliegenden Untersuchung kann als erste Grundlage für ein bayerisches „BBSK-System" dienen. Zur Erstellung eines funktionierenden Konzepts ist allerdings noch ein erheblicher Untersuchungsbedarf nötig. Dazu sollte zunächst die Datenbasis für die beiden bisher untersuchten Wuchsgebiete verbessert werden. Als nächster Schritt würde sich dabei neben der weiteren Untersuchung von Bodendauerbeobachtungsflächen die bodenzoologische Aufnahme von Naturwaldreservaten als weitgehend unbeeinflusste Referenz-Standorte anbieten.

5. Zusammenfassung

Die Aufgabe im Rahmen des Bodenschutzes ist es, schädliche anthropogene Veränderungen von natürlichen, dynamischer Entwicklung zu unterscheiden. Die Waldboden-Dauerbeobachtungflächen der Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft leisten zur Beweissicherung und als Frühwarnsystem für schädliche Bodenveränderungen einen wesentlichen Beitrag und sind damit ein unverzichtbares Kontrollinstrumen für umweltpolitische Maßnahmen. Der Bodenlebewelt kommt dabei einen besondere Rolle zu, die sich nun auch in der aktuellen Gesetzgebung niederschlägt.

Im neuen Bundes-Bodenschutzgesetz spielt das Bodenleben als Träger wichtiger Bodenfunktionen und als Schutzobjekt eine Doppelrolle. Die Grundvoraussetzung für die Erfüllung der Schutzziele ist die Berücksichtigung von Bodenorganismen beim Bodenschutz. Die hohe Komplexität des Beziehungsgeflechts und der entsprechend hohe Untersuchungsaufwand erfordern jedoch eine Beschränkung auf bestimmte Gruppen von Bodenorganismen. Bodentiere sind wegen ihrer Lebensdauer und ihrer engen Beziehung zu den Mikroorganismen die am besten geeigneten Bioindikatoren. Aufgrund der großen Bedeutung von Bodentieren und der potentiellen Gefährdung einzelner Arten ist geplant, die wichtigsten Bodentiergruppen auch bei der Fortschreibung der Roten Listen zu berücksichtigen.

Die Ergebnisse der vorgestellten bodenzoologischen Untersuchungen geben einen Einblick in den standörtlich weitgefächerten Lebensraum der Regenwürmer und Collembolen in bayerischer Waldböden. Er erstreckt sich vom Laubwald mit der Humusform Mull bis zum Nadelwald mit der Humusform Rohhumus. Die Verteilung der beiden Tiergruppen zeigen die unterschiedlichen Ansprüche an den Lebensraum auf Ebene der Taxocoenose und der Spezies deutlich auf. Die Regenwürmer dominieren in basenreichen Böden mit in der Regel aus Laubstreu entstandenen Humusformen Mull bis mullartiger Moder. In sich aus Nadelstreu entwickelnden Humusformen (vom rohhumusartigen Moder bis zum Rohhumus) nimmt die Zahl und die Bedeutung der Regenwürmer rasch ab. Basenarme und saure Böden mit der Humusform Rohhumus sind der Lebensraum, in dem die Collembolen zusammen mit den anderen Gruppen der Bodenmesofauna ihre größte Bedeutung erreichen.

Aufgrund der unterschiedlichen standörtlichen Optima und der verschiedenen Lebensweise sind Regenwürmer und Collembolen sich ideal ergänzende Indikatorgruppen. Das Indikatorpotential der Lumbricidae ist zwar aufgrund der niedrigen Artenzahl geringer als bei den Springschwänzen, ihre Autökologie ist jedoch besser untersucht und damit ihr aktueller Indikatorwert höher. Andererseits werden die Collembolen bereits in zunehmendem Maße erforscht, so daß bei dieser Gruppe mit einem wachsenden Indikatorwert zu rechnen ist.

7. Literatur

AG BODEN (1994):
Bodenkundliche Kartieranleitung. Arbeitskreis Standortskartierung (1996): Forstliche Standortsaufnahme. 5. Auflage. Münster-Hiltrup: Landwirtschaftsverlag. 188 S.

ANDERSON, J. M.; P. INESON (1983):
Interactions between soil arthropods and microorganisms in carbon nitrogen and mineral element fluxes from decomposing leaf litter. In: J. A. Lee, S. Mc Neil & I.H. Rorison (eds.): Nitrogen as an ecological factor. Oxford (Blackwell Scientific Publications), 413-432.

BECK, L. (1993):
Zur Bedeutung der Bodentiere für den Stoffkreislauf in Wäldern. Biologie in unserer Zeit, 23. Jg. 1993/5, 285-294.

BRUCKER G. und D. KALUSCHE (1990):
Boden und Umwelt 264 S. Quelle & Meyer

BUNDESMINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT UND FORSTEN (BMELF) (1997):
Deutscher Waldbodenbericht 1996: Ergebnisse der bundesweiten Bodenzustandserhebung im Wald von 1987-1993 (BZE) , Band 1, 144 S.

DUNGER, W. (1979):
Methodische Ansätze für populationsökologische Untersuchungen an Kleinarthopoden des Bodens. Vorträge der Arbeitstagung Populationsökologie. Biol. Ges. d. DDR, Sektion Ökologie, S. 49-54.

——— (1982):
Die Tiere des Bodens als Leitformen für anthropogene Umweltveränderungen; Decheniania-Beihefte (Bonn) 26, S. 151-157.

——— (1983):
Tiere im Boden. Wittenberg Lutherstadt: Ziemsen Verlag. 280 S.

DUNGER, W.; H. J. Fiedler (1989):
Methoden der Bodenbiologie. 1. Auflage. Verlag: Gustav Fischer.

DUNGER, W. (1998):
Bindung zwischen Bodenorganismen und Böden und die biologische Beurteilung von Böden.– Bodenschutz 2/98, S. 62-68.

©Bayerische Akademie für Naturschutz und Landschaftspflege (ANL)

EISENBEIS; G.; WICHARD W. (1985):
Atlas zur Biologie der Bodenarthropoden. Gustav Fischer Verlag, Stuttgart-New York.

GISIN, H. (1960):
Collembolenfauna Europas. Museum d'Histoire Naturelle Genève 312 S.

GRAEFE, U. (1992):
Die Gliederung der Zersetzergesellschaft für die standortsökologische Ansprache. – Mitteilung der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft 69, S. 95-98

HAGVAR, S. (1984):
Effects of liming and artificial acid rain on Collembola and Protura in coniferous forest. – Pedobiologia 27, 341-354.

——— (1987):
Why do collemboles and mites react to changes in soil acidity? Ent. Meddr. Copenhagen, Denmark, 55, S 115-119.

——— (1990):
Reactions to soil acidification in microarthropods: Is competition a key factor? – Biol Fertil Soils 9, S.178-181.

LEE, K.E. (1985):
Earthworms. Their Ecology and Relationships between Soil and Landuse. Sydney: Academic Press. XVII + 411 S.

MAKESCHIN, F. (1991):
Auswirkungen von saurer Beregnung und Kalkung auf die Regenwurmfauna im Fichtenaltbestand Höglwald. Ökosystemforschung Höglwald Eds. K. Kreutzer and A. Göttlein. Forstwissensch. Forsch. Heft 39, pp 117-128. Verlag Paul Parey, Hamburg, Berlin.

MEINHARDT, U. (1986):
Alles über Regenwürmer. Franckh'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart, 70 S.

MELLERT, K. (1993):
Einfluß von saurer Beregnung und kompensatorischer Kalkung auf die bodenlebenden Collembolen und andere Mikroarthropoden in einem Fichtenaltbestand. Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft 69, S. 131-134.

NORDSTRÖM, S. und S. RUNDGREN (1974):
Environmental factors and lumbricid associations in Southern Sweden. – Pedobiologia 14, 1-27.

REHFUESS, K.-E. (1990):
Waldböden. Entwicklung, Eigenschaften und Nutzung. 2.Auflage. Hamburg und Berlin: Parey. 249 S.

RÖMBKE, J.; L. BECK, B. FÖRSTER, A. RUF (1997):
Ein Instrument zur Entwicklung von Bodenqualitätszielen: Das BBSK-Konzept. Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft 85, III, S. 1599-1602.

SCHEIDLER, M. (1994):
Untersuchungen zur Bedeutung von Schadstoffbelastung und Kalkdüngung für die Collembolengemeinschaften in Nordbayerischen Fichtenforsten. Bayreuther Forum Ökologie. Vol. 6.

SCHICK, H. (1995):
Collembolen als Reaktionsinidikatoren Z. Umweltchem. Ökotox. 7 (4), S. 249-251.

SCHLICHTING, E. und H.-P. BLUME (1966):
Bodenkundliches Praktikum. Hamburg und Berlin: Parey. 211 S.

SCHÖPKE, K. (1992):
Kurzfristiger Einfluß von Mineraldüngern und Bodenhilfsstoffen (Gesteinsmehlen) auf Lumbricus rubellus und Aporrectodea caliginosa (Lumbricidae). Diplomarbeit an der Universität München (unveröffentlicht). 101 S.

SCHUBERT, A.; R. BUTZ-BRAUN, K. SCHÖPKE, K.-H. MELLERT (1995):
Waldboden-Dauerbeobachtungs-flächen in Bayern. Standarduntersuchungen, Tonmineralische Untersuchungen, Aufnahme der Humusformen, Aufnahme der Bodenfauna (Regenwürmer, Collembolen). Ein forstlicher Beitrag zum vorsorgenden Bodenschutz, dargestellt am Beispiel der zwei Dauerbeobachtungsflächen im Forstamt Kelheim. Berichte aus der Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft Nr. 4, 80 S.

SHAW, P. J. A. (1988):
A conistent hierarchy in the fungal feeding preferences of the Collembola Onychiurus armatus.– Pedobiologia 31, P. 179-187.

THIELE, A. (1990):
Nahrungswahlversuche mit farbmarkierten Bodenpilzen bei Collembolen. Braunschw. naturkundl. Schr. 3, no. 3, S. 637-653.

Wilcke, D.E. (1967):
Oligochaeta. In: Die Tierwelt Mitteleuropas. Bd. 1. Leipzig: Quelle und Meyer. 161 S.

WOLTER, H. (1963):
Vergleichende Untersuchungen zur Anatomie und Funktionsmorphologie der stechend saugenden Mundwerkzeuge der Collembolen.– Zool. Jahresbericht. Anat. 81;27-100 (Doktorarbeit an der naturwiss.-philosoph. Fak. d. TH Braunschweig)

ZERLING, L. (1990):
Zur Sukzession von Kleinarthropoden, insbesondere Collembolen, im Bodenbildungsprozess auf einer landwirtschaflich genutzten Braunkohlekippe bei Leibzig. – Pedobiologia 34, S. 315-335.

Anschrift der Verfasser:

Karl-H. Mellert
Bayerische Landesanstalt
für Wald- und Forstwirtschaft
Am Hochanger 11
85354 Freising (Weihenstephan)

©Bayerische Akademie für Naturschutz und Landschaftspflege (ANL)

Berichte der ANL
22 (1998)

Herausgeber:
Bayerische Akademie für Naturschutz
und Landschaftspflege (ANL)
Seethaler Str. 6
D - 83406 Laufen
Telefon: 0 86 82 / 89 63 - 0,
Telefax: 0 86 82 / 89 63 - 17 (Verwaltung)
0 86 82 / 89 63 - 16 (Fachbereiche)
E-Mail: Naturschutzakademie@t-online.de
Internet: http://www.anl.de

Die Bayerische Akademie für Naturschutz
und Landschaftspflege ist eine dem
Geschäftsbereich des Bayerischen Staatsministeriums
für Landesentwicklung und Umweltfragen
angehörende Einrichtung.

Schriftleitung und Redaktion:
Dr. Notker Mallach, ANL

Dieser Bericht erscheint verspätet
im Frühjahr 2000.
Für die Einzelbeiträge zeichnen die
jeweiligen Autoren verantwortlich.

Die Herstellung von Vervielfältigungen
– auch auszugsweise –
aus den Veröffentlichungen der
Bayerischen Akademie für Naturschutz
und Landschaftspflege sowie deren
Benutzung zur Herstellung anderer
Veröffentlichungen bedürfen der
schriftlichen Genehmigung unseres Hauses.

Erscheinungsweise:
Einmal jährlich

Bezugsbedingungen:
Siehe Publikationsliste am Ende des Heftes

Satz: Christina Brüderl (ANL) und
Fa. Hans Bleicher, 83410 Laufen
Druck und Bindung: Fa. Kurt Grauer, 83410
Laufen;
Druck auf Recyclingpapier (100% Altpapier)

ISSN 0344-6042
ISBN 3-931175-57-X

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: Berichte der Bayerischen Akademie für Naturschutz und Landschaftspflege (ANL)

Jahr/Year: 1998

Band/Volume: 22

Autor(en)/Author(s): Mellert Karl-Heinz, Schöpke K., Schubert A.

Artikel/Article: Bodenzoologische Untersuchungen auf bayerischen Waldboden-Dauerbeobachtungsflächen (BDF) als Bestandteil eines vorsorgenden Bodenschutzes 131-151