© Naturforschende Gesellschaft zu Freiburg im Breisgau c/o Institut für Geo- und Umweltnaturwissenschaften; download www.zobodat.at

Regenwürmer in den Böden Baden-Württembergs - Vorkommen, Gefährdung und Bedeutung für die Bodenfruchtbarkeit

Otto Ehrmann

Zusammenfassung

In den Böden Baden-Württembergs kommen 31 verschiedene Regenwurmarten vor. Die Biomasse der Regenwürmer ist größer als die aller anderen Bodentiere und übersteigt auch die Biomasse der Nutztiere.

Die Regenwürmer lassen sich in drei ökologische Gruppen einteilen: Epigäische Arten leben an der Bodenoberfläche, endogäische meist im Oberboden, anezische Arten legen tiefreichende Wohnröhren an und kommen nachts zur Nahrungsaufnahme oder Losungsablage an die Bodenoberfläche.

Das Vorkommen der Regenwürmer wird wesentlich von Bodenfeuchte, Bodenreaktion und Bodenart bestimmt. In landwirtschaftlich genutzten Flächen, vor allem in Äckern, hat die Bewirtschaftung zusätzlich einen großen Einfluss auf das Vorkommen der Regenwürmer. Besonders groß sind die Regenwurmpopulationen in Äckern mit reduzierter Bodenbearbeitung und bei mehrjährigem Ackerfutterbau.

Die Regenwurmfauna hat in den meisten Böden großen Einfluss auf Streuabbau, Nährstoffrecycling und Bodenstruktur. In Wäldern bilden sich, wenn Regenwürmer ganz oder größtenteils fehlen, Streuauflagen. An den meisten Standorten Baden-Württembergs wird die Bodenstruktur von Regenwürmern wesentlich mitbestimmt. Dies gilt in besonderem Maß für die Unterbodenstruktur, wo die Röhren der großen tiefgrabenden Regenwurmarten die häufigsten großen Hohlräume sind. Diese für Durchwurzelung, Belüftung und Entwässerung sehr günstigen Strukturen sind im Laufe von Jahrzehnten/Jahrhunderten durch Regenwürmer gebildet worden, durch Verdichtung und zu tiefe Bodenbearbeitung können sie aber in kurzer Zeit zerstört werden.

Stichwörter
Regenwürmer, Bodenstruktur

Anschrift des Verfassers:
Dr. Otto Ehrmann
Münster 12
97993 Creglingen
otto.ehrmann@gmx.de

© Naturforschende Gesellschaft zu Freiburg im Breisgau c/o Institut für Geo- und Umweltnaturwissenschaften; download www.zobodat.at

Earthworms in the soils of Baden-Württemberg – occurrence, endangering and significance for soil fertility

Summary

In the soils of Baden-Württemberg 31 different earthworm species occur. The biomass of earthworms is bigger than that of all other soil animals and also exceeds the biomass of livestock. The earthworms can be divided into three ecological groups. Epigeic species live on the soil surface, endogeic mostly in the topsoil, anecic types create deep burrows and come out at night to the soil surface for food intake and deposition of casts.

The presence of earthworms is essentially determined by soil moisture, soil reaction and soil texture. In agricultural areas, especially in arable fields, the management has also a great influence on the occurrence of earthworms. Huge earthworm populations can be found in arable fields with reduced tillage and in fields with perennial forage cropping.

The earthworm fauna has great influence on litter decomposition, nutrient recycling and soil structure in most soils. In forests with less or no earthworms litter layers accumulate. At most locations in Baden-Württemberg, the soil structure is essentially determined by earthworms. This is particularly true for subsoil horizons where the burrows of the anecic earthworm species are the most common large tubes. This is very favorable for rooting, aeration and infiltration. These structures have been formed in the course of decades/centuries by earthworms, but they can be destroyed in a short time by compaction or deep tillage.

Keywords
Earthworms, soil structure

Anmerkung des Autors
Der Beitrag basiert auf Regenwurmuntersuchungen, die im Zeitraum von 1989 bis 2015 in Baden-Württemberg, meist im Auftrag von Umweltministerium, LTZ und LUBW durchgeführt wurden. In Teilen der Arbeit werden auch die Ergebnisse einer Literaturstudie über Regenwürmer, die im Auftrag der LUBW durchgeführt wurde, verwendet.

© Naturforschende Gesellschaft zu Freiburg im Breisgau c/o Institut für Geo- und Umweltnaturwissenschaften; download www.zobodat.at

1. Einleitung

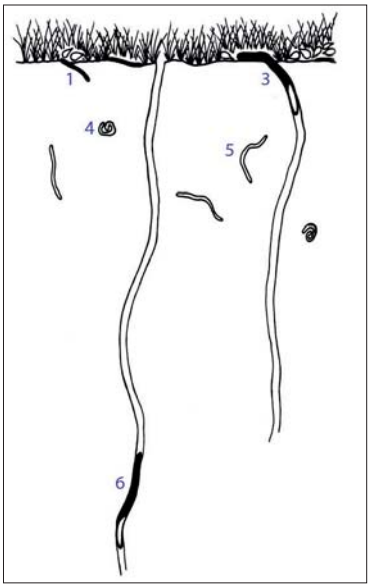
Der Boden wird von einer Vielzahl verschiedener Organismen besiedelt (Dunger 1983), deren Tätigkeit großen Einfluss auf seine Fruchtbarkeit hat. Regenwürmer sind aufgrund ihrer Leistungen und ihrer oft großen Biomasse wohl die wichtigsten bodenbewohnenden Tiere in Mitteleuropa. In dieser Arbeit werden die in Baden-Württemberg vorkommenden Regenwurmarten vorgestellt. Es wird gezeigt, von welchen Faktoren das Vorkommen der Regenwürmer abhängig ist und welche Bedeutung Regenwürmer beim Abbau der Streu und beim Aufbau des Bodengefüges haben.

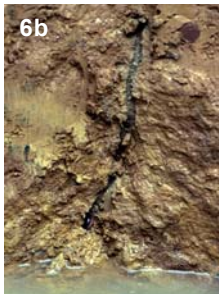
2. Einteilung in drei ökologische Gruppen

Die Regenwürmer können aufgrund unterschiedlicher Lebensweise und äußerer Merkmale in drei ökologische Gruppen eingeteilt werden. Diese Einteilung wurde unabhängig von Bouche (1972, 1977) und Lee (1959, zitiert nach Lee 1985) entwickelt.

Streubewohnende (**epigäische**) Regenwürmer leben meist auf dem Boden, oft in Streuauflagen. Daher sind sie zum Schutz vor UV-Strahlung durchgehend dunkel gefärbt. Sie sind klein bis mittelgroß (2 - 12 cm). Aufgrund ihrer oberflächennahen Lebensweise sind sie von Fressfeinden und Austrocknung besonders bedroht. In Äckern sind sie aufgrund des Fehlens einer Streuauflage selten. Ihr Verbreitungsschwerpunkt liegt im Grünland und im Wald. Epigäische Regenwürmer legen keine dauerhaften Röhren an. Sie haben große Bedeutung beim Streuabbau, ihr Einfluss auf die Struktur des Mineralbodens ist im Vergleich zu den anderen Gruppen gering. Flachgrabende (**endogäische**) Regenwürmer leben meist im Oberboden, aber selten nahe der Bodenoberfläche. Eine Pigmentierung zum Schutz vor UV-Strahlung ist daher bei ihnen nicht notwendig. Bei manchen Arten ist die Haut ± transparent, andere sind gräulich bis rötlich, jedoch im Gegensatz zu den beiden anderen Gruppen nie dunkel gefärbt. Die 3 - 15 cm langen Tiere sind in vielen Böden die am zahlreichsten vertretene Gruppe. Flachgrabende Regenwürmer legen ebenfalls keine dauerhaften Röhren an. Sie fressen aber, weil ihre Nahrung aufgrund des hohen Anteils an Mineralboden relativ nährstoffarm ist, besonders viel Boden und sorgen daher bei zahlreichem Vorkommen für einen krümeligen Oberboden. Nur tiefgrabende (**anezische**) Regenwürmer legen eine dauerhafte, senkrecht orientierte Wohnröhre mit Mündung zur Bodenoberfläche an. Dorthin kommen sie zur Nahrungsaufnahme und Paarung, verlassen dabei aber in der Regel ihre Wohnröhre nur mit dem Vorderteil, das Hinterende bleibt in der Röhre. Das Vorderteil der meist 15 - 25 cm großen Tiere ist daher dunkel, das Hinterende aber im Gegensatz zu den streubewohnenden Arten meist weniger intensiv gefärbt. Bei Störungen oder Trockenheit können sie sich tief in den Unterboden zurückziehen. Manche Arten ziehen Blätter oder Stroh zu ihrer Röhrenmündung. So kann man ihr Vorkommen leicht erkennen.

© Naturforschende Gesellschaft zu Freiburg im Breisgau c/o Institut für Geo- und Umweltnaturwissenschaften; download www.zobodat.at





Bilder 1-7: Beispiele zu ökologischen Gruppen von Regenwürmern (Ehrmann 1996)

In der Skizze (Bildmitte, linke Seite) werden die Lebensräume der drei ökologischen Gruppen schematisch dargestellt (1 = epigäische, 4 und 5 = endogäische, 3 und 6 = anezische Regenwürmer). Die Nummern in der Skizze sind konform zu den Bildnummern.

© Naturforschende Gesellschaft zu Freiburg im Breisgau c/o Institut für Geo- und Umweltnaturwissenschaften; download www.zobodat.at

Bild 1: *Lumbricus rubellus*. **Bild 2:** Tiefgrabender Regenwurm bei der Losungsablage an der Bodenoberfläche. **Bild 3:** *Lumbricus terrestris* beim Einziehen eines Laubblattes. **Bild 4:** *Aporrectodea rosea* im Ruhestadium während einer Sommertrockenheit. Zum Schutz vor Austrocknung hat dieser Wurm eine kleine Höhle gebildet und sie mit Schleimstoffen ausgekleidet. Er kann so mehrere Monate Trockenheit überdauern. **Bild 5:** *Aporrectodea icterica* in natürlicher Lage im Oberboden. **Bild 6a:** Die Röhre eines tiefgrabenden Regenwurms wurde beim Graben freigelegt. Das helle Hinterende des Wurms befindet sich noch z. T. in der Röhre. Die wesentlich dunklere Pigmentierung des Vorderteils ist deutlich zu erkennen. In **Bild 6b** ist die dunkle Kopfspitze eines tiefgrabenden Regenwurms am unteren Ende seiner Wohnröhre in 130m Tiefe zu sehen. **Bild 7:** *Octolasion lacteum*, ein großer endogäischer Regenwurm. Typisch ist die gelbe Schwanzspitze.

3. Die Regenwürmer Baden-Württembergs

Kommen in allen Böden Baden-Württembergs Regenwürmer vor?

Von 204 untersuchten Standorten in Baden-Württemberg waren nur 4 regenwurmfrei. Dabei handelte es sich um zwei Greens von Golfplätzen (Albrecht 1998) und um zwei stark erodierte Äcker im Kraichgau (Ehrmann 1996). Auf den Greens der Golfplätze sind Regenwürmer unerwünscht, daher werden Regenwurmpopulationen durch verschiedene Maßnahmen minimiert (Baker & Binns 1998).

Arten, Abundanzen, Biomassen in verschiedenen Ökosystemen

In Deutschland kommen 46 Regenwurmarten vor (Lehmitz et al. 2014). In Baden-Württemberg wurden bisher 31 Regenwurmarten gefunden (Tab. 1). Diese kann man hinsichtlich ihrer Bedeutung für Nährstoffhaushalt und Bodenstruktur vereinfacht in drei Gruppen einteilen (Maßstab für die Einteilung ist die durchschnittliche Biomasse, zur Herkunft der Daten siehe Anmerkung bei Tab. 1):

a) große Bedeutung
- *Lumbricus terrestris* (14 g/m²)
- *Aporrectodea caliginosa* (13g/m²)

b) mittlere Bedeutung
- *Lumbricus rubellus* (6 g/m²)
- *Aporrectodea longa* (6 g/m²)
- *Aporrectodea rosea* (5 g/m²)
- *Octolasion lacteum* (7 g/m²)

c) alle anderen Arten weisen Biomassen von 1 g/m² oder weniger auf und haben daher im Mittel in Baden-Württemberg nur eine geringe Bedeutung. Es gibt aber Standorte, an denen diese Arten wichtig sein können. So haben die beiden sehr großen Arten *Lumbricus badensis* und *L. polyphemus* an manchen Waldstandorten im Südschwarzwald bzw. in den weniger versauerten Wäldern auf der Schwäbischen Alb

© Naturforschende Gesellschaft zu Freiburg im Breisgau c/o Institut für Geo- und Umweltnaturwissenschaften; download www.zobodat.at

große Bedeutung für Streuabbau und Bodenstruktur. Die sehr kleinen *Dendrobaena*-Arten können in versauerten Wäldern in der Rheinebene oder im Odenwald in großer Zahl vorkommen und dann die Streuauflage beeinflussen.

Im Mittel wurden in Baden-Württemberg nur 3,9 Regenwurmarten je Standort gefunden. Differenziert man die Artenzahl nach Nutzung, so zeigt sich, dass Grünland die meisten Arten aufweist (5,0). Im Acker (3,9) und Wald (3,5) kommen weniger Arten vor (Tab. 1). Dieser an sich sehr niedrige Wert ist für Regenwürmer „normal" – es kommen immer nur wenige Regenwurmarten an einem Standort vor. In Bayern wurden z. B. ähnlich wenige Arten gefunden (Bauchhenss 2007), in Sachsen-Anhalt und Thüringen noch weniger (3,1: Tischer 2007). Als Konsequenz gibt es nur eine sehr geringe Redundanz der von den Regenwürmern ausgefüllten Bodenfunktionen. Der Ausfall einer einzigen Art kann schon die Eigenschaften von Standorten verändern, vor allem wenn es sich um eine große anezische Art handelt.

Anmerkungen zu den Daten in Tab. 1:

- Die Daten beruhen vor allem auf eigenen Untersuchungen, die zwischen 1989 und 2015 in Baden-Württemberg durchgeführt wurden. Außerdem werden die Ergebnisse von zwei vom Autor betreuten Diplomarbeiten (Vollmer 1999, Albrecht 1998) verwendet.
- Bei allen Untersuchungen wurde die Methodenkombination von Elektrofang (Thielemann 1986) und Handauslese verwendet. Seit 2008 wird zusätzlich – aber nur beim Vorkommen von tiefgrabenden Arten – eine AITC-Lösung eingesetzt (Zaborski 2003). Die Regenwürmer und Boden und Vegetation schädigende Formalinmethode wurde nur im Rahmen eines Methodenvergleichs verwendet (Ehrmann & Babel 1989).
- Da die Regenwurmuntersuchungen nicht primär das Ziel hatten, die Regenwurmfauna Baden-Württembergs zu ermitteln, sind die Flächen naturgemäß nicht repräsentativ übers Land verteilt, die Nutzungstypen wurden aber fast anteilig erfasst. Durch die (für Regenwurmuntersuchungen) große Anzahl an Standorten (204) ergibt sich insgesamt eine gute Übersicht.
- Eine Reihe von Standorten wurde mehrfach untersucht. In diesem Fall wurde nur die Erstuntersuchung verwendet. An einigen Standorten wurden verschiedene Varianten nebeneinander untersucht (z. B. Direktsaat vs. Pflug), in solchen Fällen wurde nur die betriebsübliche Variante verwendet.
- Juvenile und beschädigte Tiere konnten manchmal nicht bis zur Art bestimmt werden. Sie fehlen daher in Tab. 1. Daher kann auch aus Tab. 1 nicht die Gesamtanzahl und die Gesamtbiomasse der Regenwürmer ermittelt werden.
- Bei Arten mit geringer Stetigkeit beruht die mittlere Biomasse auf wenigen Exemplaren.
- Gesichert nachgewiesen - aber nicht vom Autor gefunden - wurden in Baden-Württemberg noch *Lumbricus festivus* (Gefu 1993), *Aporrectodea thaleri* (Becker 1999) sowie *Proctodrilus antipae* (Beck et al. 2001).
- Die Art *Eisenia fetida* (alte Bezeichnung *E. foetida*) findet man oft in großer Zahl in Komposthaufen, selten aber im „normalen" Freiland.

© Naturforschende Gesellschaft zu Freiburg im Breisgau c/o Institut für Geo- und Umweltnaturwissenschaften; download www.zobodat.at

Tab. 1: Regenwurmarten in Baden-Württemberg (Tabelle nach Ehrmann 2008, ergänzt um Neufunde von Ehrmann bis 2015). **Tab. 1**: Earthworm species in Baden-Württemberg (Table after Ehrmann 2008 supplemented with new findings from Ehrmann until 2015)

	Biomasse adulte [g]	Stetigkeit				Ø Biomasse [g/m²]				Ø Abundanz [Indiv./m²]			
	Ø	A	G	W	Ø	A	G	W	Ø	A	G	W	Ø
epigäische													
Allolobophoridella eiseni	0,27	/	/	1	1	/	/	0	0	/	/	0	0
Dendrobaena attemsi	0,11	/	/	6	3	/	/	0	0	/	/	3	2
Dendrobaena octaedra	0,14	/	2	32	17	/	0	1	0	/	0	4	2
Dendrobaena pygmaea	0,02	/	/	5	2	/	/	0	0	/	/	0	0
Dendrodrilus rubidus	0,12	/	/	17	9	/	/	0	0	/	/	1	0
Eisenia fetida	0,16	/	/	1	1	/	/	0	0	/	/	0	0
Eiseniella tetraedra	0,07	/	10	9	6	/	0	0	0	/	4	5	4
Lumbricus castaneus	0,18	3	33	12	14	0	1	0	0	0	4	1	1
Lumbricus meliboeus	0,46	/	/	1	1	/	/	0	0	/	/	0	0
Lumbricus rubellus	1,07	27	57	72	56	1	6	9	6	2	12	15	11
anezische													
Aporrectodea longa (en)	2,04	36	33	8	21	6	20	1	6	7	18	1	6
Fitzingeria platyura	3,73	/	2	/	0	/	0	/	0	/	0	/	0
Lumbricus badensis	22,92	/	/	1	1	/	/	2	1	/	/	0	0
Lumbricus friendi	1,42	/	/	1	1	/	/	0	0	/	/	0	0
Lumbricus polyphemus	10,57	2	2	3	2	2	0	1	1	1	0	0	0
L. rubellus friendoides	2,50	/	/	11	5	/	/	2	1	/	/	1	1
Lumbricus terrestris	4,01	66	79	23	47	11	32	8	14	18	24	4	12
Nicodrilus nocturnus (en)	1,28	1	2	1	1	0	1	0	0	0	1	0	0
endogäische													
Allolobophora chlorotica (ep)	0,28	32	26	3	16	3	1	0	1	18	6	0	7
Aporrectodea caliginosa	0,47	90	90	36	63	14	28	4	12	54	102	13	43
Aporrectodea georgii	0,04	2	/	/	0	0	/	/	0	0	/	/	0
Aporrectodea handlirschi	0,23	3	2	14	8	0	0	1	1	0	0	8	4
Aporrectodea icterica	0,76	15	17	/	8	1	2	/	1	3	3	/	2
Aporrectodea limicola	0,33	/	/	2	1	/	/	0	0	/	/	1	1
Aporrectodea rosea	0,23	69	93	48	63	3	10	3	5	21	74	26	34
Murchieona miniscula	0,04	2	/	/	0	0	/	/	0	0	/	/	0
Octolasion cyaneum	2,01	5	5	8	6	1	1	1	1	0	0	1	0
Octolasion lacteum	1,06	32	50	38	39	3	9	8	7	6	16	15	13
Ø Anzahl von Arten		3,9	5,0	3,5	3,9								

/ = kein Regenwurm, 0= Wert zwischen >0 und <0,5, daher auf 0 abgerundet, A=Acker (n=59), G=Grünland (n=42), W=Wald (n=103). Übergangsformen haben einen Zusatz hinter dem Namen (en = Übergang zu endogäischer Lebensweise, ep = Übergang zu epigäischer Lebensweise)

© Naturforschende Gesellschaft zu Freiburg im Breisgau c/o Institut für Geo- und Umweltnaturwissenschaften; download www.zobodat.at

Bilder 8-16: Übersicht- und Detailfotos von verschiedenen Regenwurmarten

© Naturforschende Gesellschaft zu Freiburg im Breisgau c/o Institut für Geo- und Umweltnaturwissenschaften; download www.zobodat.at

Bild 8: zeigt einen eher kleinen *Lumbricus badensis* (Körperlänge 35 cm, Gewicht 23g). Große Exemplare können bis zu 40 g schwer werden. **Bild 9:** *Lumbricus castaneus*, ein kleiner epigäischer Regenwurm. Er kommt vor allem im Grünland vor und ist durchgehend dunkel pigmentiert. **Bild 10:** Der nur ca. 5 cm große *Dendrobaena octaedra* kommt vor allem in Humusauflagen von Wäldern vor. **Bild 11:** *Aporrectodea rosea* lebt im Oberboden. Typisch ist das rosafarbene Clitellum bei geschlechtsreifen Tieren. Diese drüsenreiche Region gibt spezielle Sekrete bei Befruchtung und Kokonbildung ab. **Bild 12:** Bei *Allolobophora chlorotica* findet man häufig Exemplare mit grünem Vorderteil. **Bild 13 und 14:** Vorderteil und Hinterteil von *Octolasion cyaneum*. Auch hier weist der Artname auf die Färbung hin. Wie bei der sehr ähnlichen Art O. lacteum ist die Schwanzspitze häufig gelb gefärbt. **Bild 15** zeigt einen relativ großen *Aporrectodea caliginosa*. Er kam nach einem Starkregen an die Bodenoberfläche. Links und rechts unten im Bild sind winzig kleine gelbe Collembolen zu sehen. Ein Exemplar ist im rechten Eck vergrößert dargestellt. **Bild 16:** *Lumbricus polyphemus* ist der zweitgrößte Regenwurm Deutschlands. Typisch für diese Art ist die dunklere Färbung der Segmentgrenzen. Er kommt deutlich häufiger als L. badensis vor, ist aber viel seltener als der kleinere *Lumbricus terrestris* (Bild 17).

Vergleich mit den Biomassen von Menschen und Nutztieren

In Tab. 2 werden Biomassen von Menschen, Rindern, Schweinen und Regenwürmern miteinander verglichen. In Baden-Württemberg haben die Regenwürmer eine deutlich größere Biomasse als die Menschen und ihre Nutztiere zusammen.

Tab. 2: Vergleich der Biomassen von Menschen, Rindern, Schweinen und Regenwürmern in Baden-Württemberg. **Tab. 2**: Comparison of the biomass of people, cattle, pigs and earthworms in Baden-Württemberg

	Menschen	Rinder	Schweine	Regenwürmer
Biomasse* [t]	752 500	525 000	106 000	2 300 000

* hochgerechnet (Menschen 70kg, Rinder 500 kg, Schweine: 50 kg

Quelle: Statistisches Landesamt Baden-Württemberg 2008a

Lumbricus badensis – die einzige endemische Regenwurmart in Baden-Württemberg

Lumbricus badensis (Bild 8) ist der mit Abstand größte Regenwurm Deutschlands. Er kann im ausgestreckten Zustand bis zu 60 cm lang werden. Sein Vorkommen ist weitgehend auf mittlere und höhere Lagen des Südschwarzwalds mit atlantisch geprägtem Klima beschränkt. Die Arealuntergrenze korreliert relativ gut mit Isolinien des Trockenheitsindexes. Daneben spielen noch geologische Faktoren eine Rolle. *Lumbricus badensis* meidet kalkhaltiges Gestein und kommt selten im Buntsandsteingebiet vor. Der Regenwurm hat aufgrund seiner Grableistung (große Röhren bis in 2,5 m Tiefe) und seiner Rolle beim Streuabbau - bei Präsenz von *L. badensis* ist die Humusform günstiger - einen großen Einfluss auf den Standort (alle Angaben nach Lamparski 1985).

© Naturforschende Gesellschaft zu Freiburg im Breisgau c/o Institut für Geo- und Umweltnaturwissenschaften; download www.zobodat.at

Bild 17: Tiefgrabende Regenwürmer an der Bodenoberfläche. Nach ergiebigen Niederschlägen kamen in der Nacht fast alle ***Lumbricus terrestris*** an die Bodenoberfläche zur Nahrungssuche. Das Bild ist eine Kombination von Langzeitbelichtung und Blitzlicht.

© Naturforschende Gesellschaft zu Freiburg im Breisgau c/o Institut für Geo- und Umweltnaturwissenschaften; download www.zobodat.at

4. Fortpflanzung und Ausbreitung

Fortpflanzung

Regenwürmer sind Zwitter. Bei der Paarung tauschen die Partner Sperma aus (Bild 18). Dieses wird in speziellen Samenbehältern gespeichert. Die eigentliche Befruchtung findet erst kurz nach der Eiablage statt. Das Ei wird aber nicht einfach in den Boden abgegeben, sondern ist von einer schützenden Hülle, die auch Nährflüssigkeit enthält, umgeben (=Regenwurmkokon, Bild 19). Die Kokons werden sukzessive gebildet und im Boden abgelegt. Nach einer Entwicklungszeit von mehreren Monaten, abhängig von der Bodentemperatur, schlüpfen die kleinen Regenwürmer aus den Kokons (Graff 1953, 1983, Edwards & Lofty 1977). Ein Teil der Regenwurmarten kann sich auch parthenogenetisch fortpflanzen. Die Anzahl der Nachkommen liegt bei anezischen und endogäischen Arten deutlich unter 50 pro Jahr (Evans & Guild 1948), bei den stärker unter Witterungsschwankungen und Prädation leidenden epigäischen Arten ist sie etwas größer Die Regenwürmer haben damit im Vergleich zu anderen kleinen Tieren eine relativ lange Entwicklungszeit und eine vergleichsweise geringe Nachkommenzahl.

Ausbreitung

Die aktive Ausbreitung von Regenwurmpopulationen ist mit 5 bis 10 m pro Jahr sehr gering (Marinissen & van den Bosch 1992, Bild 20). In 10 000 Jahren können Regenwürmer daher nur ca. 100 km weit wandern. Die Besiedlung von Mitteleuropa und Skandinavien nach der letzten Eiszeit lässt sich daher nur durch die Kombination von aktiver Wanderung und passivem Transport durch Wasser, Tiere und den Menschen erklären.

Die relativ lange Fortpflanzungszeit und das geringe Wanderungsvermögen haben zu Folge, dass eine Regenwurmpopulation durch ein nicht adäquates Nutzungssystem zwar sehr rasch dezimiert, aber im umgekehrten Fall durch günstige Bewirtschaftung nur allmählich wieder aufgebaut werden kann.

Bild 18: *Lumbricus terrestris* bei der Paarung an der Bodenoberfläche. *Lumbricus terrestris* ist der häufigste anezische Regenwurm. Die Paarung findet meist nachts nach ergiebigen Niederschlägen statt. Die Tiere bleiben dabei mit dem Hinterende in ihrer Wohnröhre.

© Naturforschende Gesellschaft zu Freiburg im Breisgau c/o Institut für Geo- und Umweltnaturwissenschaften; download www.zobodat.at

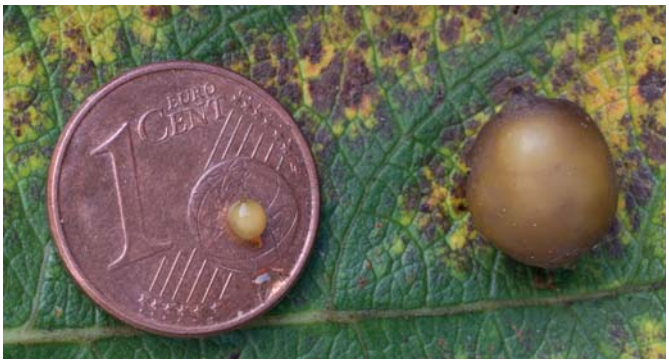


Bild 19: Zwei Regenwurmkokons. Der große Kokon stammt von Lumbricus badensis.

Bild 20:*Octolasion lacteum* bei der Wanderung. Diese Art kann häufig an der Bodenoberfläche beobachtet werden. In aller Regel kommen die Regenwürmer nach ergiebigen Niederschlägen an die Bodenoberfläche, weil dann günstige Bedingungen für die Wanderung bestehen. Sauerstoffmangel durch Wasserüberstau ist sehr selten die Ursache für das Verlassen des Bodens.

5. Welche Faktoren bestimmen das Vorkommen von Regenwürmern?

Das Vorkommen der Regenwürmer ist zum einen von naturgegebenen, nicht beeinflussbaren Standortsfaktoren (Klima, Witterung, Bodenart und Bodentyp) und zum anderen von der Bewirtschaftung abhängig. Daher gibt es eine sehr große Variabilität beim Vorkommen der Regenwürmer. So wurden z. B. in 67 untersuchten Äckern Baden-Württembergs pro m² zwischen 0 und 413 g (= 4,13 t/ha) Regenwurmbiomasse gefunden (Abb. 6).

5.1 Einfluss von Klima und Boden

5.1.1 Temperatur

Regenwürmer kommen von der Tundra (Berman et al. 2001) bis in die Tropen (Martin 1991, Lavelle et al. 1992) vor. Nordeuropäische Exemplare der auch in Mitteleuroppa

© Naturforschende Gesellschaft zu Freiburg im Breisgau c/o Institut für Geo- und Umweltnaturwissenschaften; download www.zobodat.at

vorkommenden Art *Dendrobaena octaedra* können z.B. ein Einfrieren bis minus 10° C überstehen, die Kokons sind noch frostresistenter. Die nordische Art *Eisenia nordenskioldi* übersteht auch ein Einfrieren von unter minus 30° C (Berman et al. 2001). Mitteleuropäische Arten überstehen Temperaturen von unter minus 3 °C nicht, ihre Kokons sind aber ebenfalls frostresistenter (Holmstrup & Zachariassen 1996). Die Überlebensstrategie mitteleuropäischer Arten im Winter ist daher das Vermeiden von Einfrieren durch Aufsuchen der nicht gefrorenen tieferen Bodenschichten.

Regenwürmer können also prinzipiell mit Temperaturen zurechtkommen, die deutlich über oder unter den für Mitteleuropa üblichen liegen. Wichtige einheimische Arten wie *Lumbricus terrestris, Aporrectodea caliginosa, Aporrectodea rosea* und *Allolobophora chlorotica* kommen z. B. auch in Südschweden (Nordström & Rundgren 1974) und Südfrankreich (Bouche 1972) vor. In Südfrankreich fehlen zwar *Aporrectodea longa*, *Lumbricus rubellus* und *Octolasion lacteum*, dafür kommen aber zahlreiche andere Arten vor (Bouche 1972).

5.1.2 Bodenfeuchte

Regenwürmer sind nach Dunger (1983) zu den Feuchtlufttieren zu zählen, die aufgrund ihres Körperbaus nicht in der Lage sind, bei wechselnder Bodenfeuchte einen konstanten Körperwassergehalt aufrecht zu erhalten. Vielmehr steht der Körperwassergehalt mit der Feuchte der Umgebung ± im Gleichgewicht.

An Trockenheit sind Regenwürmer durch folgende Mechanismen angepasst: Endogäische und anezische Arten können kürzere Trockenphasen überdauern, indem sie sich in feuchtere Bodenschichten im Unterboden zurückziehen (anezische Arten) oder in tieferen Bereichen des Bodens Ruhestadien bilden (endogäische, siehe Bild 4). Epigäische Arten suchen horizontal feuchtere Bereiche auf, z. B. unter Baumstämmen. In diesem Zusammenhang sind auch die relativ hohen Reproduktionsraten epigäischer Arten (r-Strategen) zu sehen.

Hohe Bodenfeuchte allein ist für Regenwürmer nicht schädlich. Regenwürmer können in nassen Böden überleben, allerdings nur, wenn diese genügend Sauerstoff enthalten (Edwards & Bohlen 1996). Bei Sauerstoffmangel im Boden wird daher das Vorkommen der tiefgrabenden anezischen Arten am ehesten eingeschränkt. Das Vorkommen epigäischer und endogäischer Arten wird dagegen i. d. R. nicht beeinträchtigt, da ihr Lebensraum nahe der Bodenoberfläche auch an nassen Standorten meist ausreichend mit Sauerstoff versorgt ist.

Im Gegensatz zum leicht zu messenden und zeitlich wenig variablen pH-Wert gibt es kaum brauchbare Beziehungen zwischen Regenwurmpopulation und Bodenfeuchte – punktuelle Messungen sind wenig aussagefähig und der Aufwand für die notwendigen mehrjährigen Messungen an einer Vielzahl von Standorten ist einfach zu groß.

© Naturforschende Gesellschaft zu Freiburg im Breisgau c/o Institut für Geo- und Umweltnaturwissenschaften; download www.zobodat.at

Ehrmann et al. (2002) verwendeten bei Untersuchungen in baden-württembergischen Wäldern den Ansatz der Bodenkundlichen Feuchtstufe (BFS, Ministerium für Umwelt und Verkehr Baden-Württemberg 1995). Die Bodenkundliche Feuchtestufe wird anhand von Daten, die sich durch eine Bodenprofilaufnahme (Bodentyp, Bodenart, pflanzenverfügbare Wassermenge) ergeben, sowie aus der geographischen Lage (Relieflage, Exposition, Inklination) und klimatischer Wasserbilanz (aus Karten) berechnet. Die Standorte werden auf einer Skala von BFS 0 (trocken) bis BFS 10 (nass) eingestuft. Der Vergleich von Regenwürmern und BFS in 44 Wäldern Baden-Württembergs ergab (Abb. 2 oben, Ehrmann et al. 2002):

- In einem großen Bereich von BFS 2 bis 8 können alle drei ökologischen Gruppen vorkommen.
- An den trockensten Standorten wurden nur endogäische Regenwürmer gefunden.
- An nassen Standorten fehlten tiefgrabende Arten.

Auswirkungen der Witterung

Das gemäßigte Klima in Mitteleuropa ist prinzipiell günstig für Regenwürmer; auch sind die Regenwürmer an normale Schwankungen der Witterung angepasst. Jahre mit sehr geringen Niederschlägen sind prinzipiell aber ungünstig für Regenwürmer, die Reaktion der Regenwurmpopulation ist aber nicht linear zur Niederschlagsmenge, sondern sehr von Boden und Vegetation abhängig und daher schwierig zu prognostizieren. So zeigte sich in einer Zeitreihe der Abdeckschicht der Deponie Leonberg, zwar wie erwartet, ein deutlicher Einfluss des trockenen Jahres 2003 (Abb. 1). Noch gravierender waren allerdings die Auswirkungen der trockenen Frühjahre 2011 und 2014. Mittlerweile hatten sich nämlich die 2001 gepflanzten Zitterpappeln zu ca. 10 - 15 m hohen Bäumen entwickelt. Diese verbrauchten so viel Wasser – nachgewiesen durch Bodenfeuchtemessungen bis 135 cm Tiefe - dass der Boden bis zum Spätherbst nicht mehr feucht wurde. Dies führte, trotz ansonsten günstiger Bedingungen, (Bodenart, pH-Wert) zu einem fast völligem Zusammenbruch der Population (Abb. 1, Wattendorf et al. 2015).

© Naturforschende Gesellschaft zu Freiburg im Breisgau c/o Institut für Geo- und Umweltnaturwissenschaften; download www.zobodat.at

Mögliche Auswirkungen eines Klimawandels

Eine Zunahme der Jahresdurchschnittstemperatur ist nicht besonders problematisch für Regenwurmpopulationen, langfristig werden allerdings vermutlich einige einheimische Arten verschwinden und dafür südeuropäische Arten einwandern. Problematischer sind vermutlich zunehmend trockene Sommer, weil Trockenheit keine Regenwurmaktivität zulässt und lange Trockenperioden zu hohen Verlusten führen. Möglicherweise sind auch manche tiefgründigen Böden bei einem Klimawandel mit trockenerem Sommer keine guten Lebensräume für Regenwürmer. Diese Böden speichern zwar deutlich mehr und deutlich länger Wasser als flachgründige Böden, sie brauchen aber auch besonders viel Wasser um wieder feucht zu werden. Als Folge dessen können in manchen tiefgründigen Böden Trockenperioden für Regenwürmer besonders lange dauern.

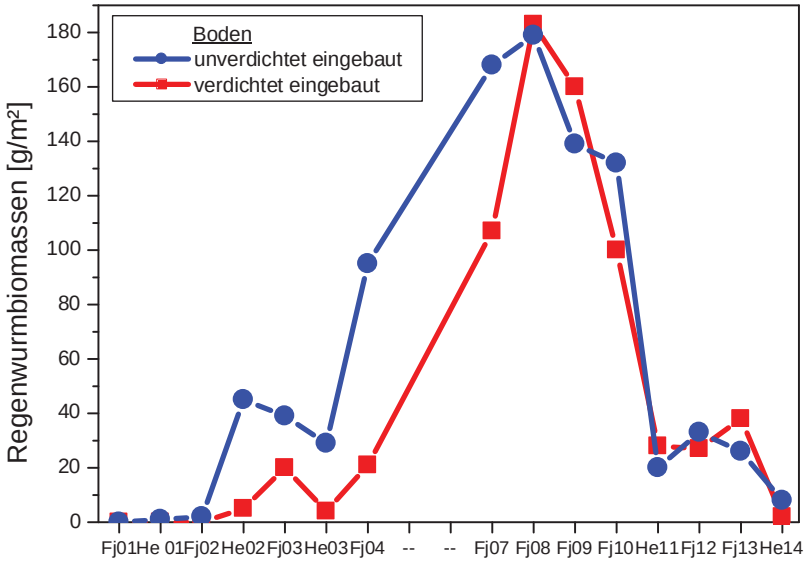


Abb. 1: Entwicklung der Regenwurmpopulation in zwei Testfeldern der Abdeckschicht der Deponie Leonberg von 2001 bis 2014 (Fj = Frühjahr, He = Herbst). Die Felder wurden im Herbst 2000 angelegt. In beiden Feldern wurde 2 m Lösslehm (Bodenart Ut4, pH 7,2) eingebaut. In einem Feld wurde er in einer Lage ohne zusätzliche Verdichtung eingeschoben, im anderen Feld wurden die drei unteren Lagen mit einer Walze zur Verbesserung der Standsicherheit verdichtet. Die Felder wurden begrünt und mit Zitterpappeln bepflanzt. Die Regenwürmer überlebten die Bodenumlagerung praktisch nicht, daher wurden im Frühjahr 2002 Regenwürmer ausgesetzt (WATTENDORF et al. 2015). **Fig. 1:** Development of earthworm populations in two test fields of reclaimed soil of the landfill Leonberg 2001-2014 (Fj = spring, He = autumn). The fields have been created in the fall 2000th. In both fields 2m loamy soil (pH 7.2) was installed. Field 1 (blue line) was installed without additional compaction. Field 2 (red line) was installed with three mechanically compacted single layers to improve stability. The fields were sown with grass & herbs and planted with aspens. The earthworms did not survive the land reclamation terefore in spring 2002 earthworms from a pasture were exposed (WATTENDORF et al. 2015).

© Naturforschende Gesellschaft zu Freiburg im Breisgau c/o Institut für Geo- und Umweltnaturwissenschaften; download www.zobodat.at

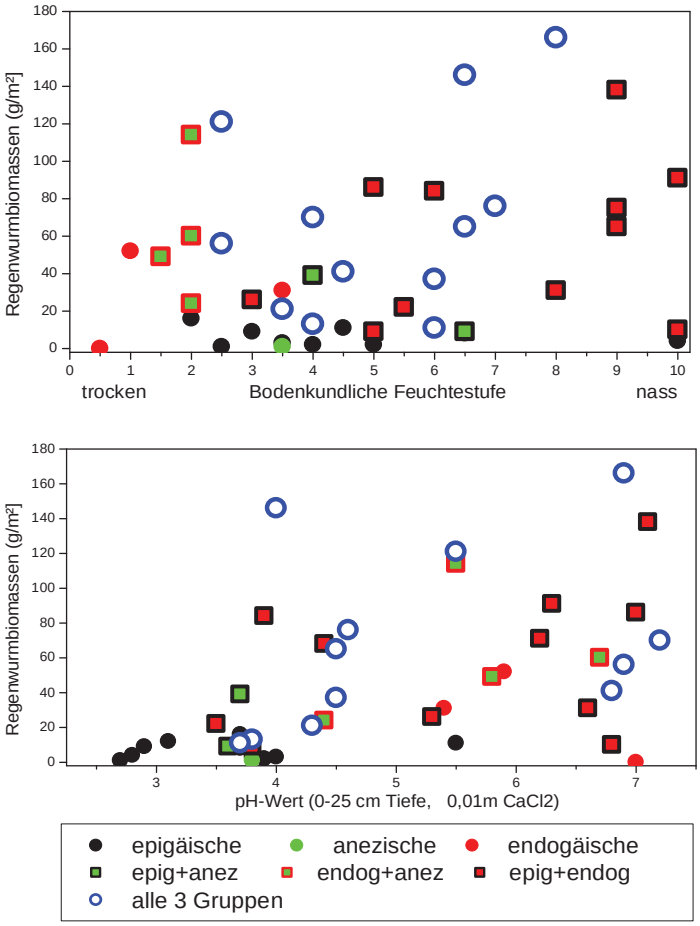


Abb 2: Einfluss von Bodenfeuchte (oben) und pH-Wert (unten) auf die Regenwurmbiomassen in Wäldern Baden-Württembergs (EHRMANN et al. 2002, verändert).
Fig. 2: Influence of soil moisture (top) and pH (below) on the earthworm biomass in forests of Baden-Württemberg (EHRMANN et al. 2002, modified).

5.1.3 pH-Wert des Bodens

Der pH-Wert wird von vielen Autoren als einer der Haupteinflussfaktoren auf die Verbreitung von Regenwürmern angesehen. Zahlreiche Autoren (z. B. GLASSTETTER 1991, MUYS & GRANVAL 1997, NORDSTRÖM & RUNDGREN 1974 und TERHIVUO 1989) beschreiben die Abhängigkeit zwischen der Größe der Regenwurmpopulationen und dem pH-Wert mittels linearer Beziehungen. Diese Autoren betrachten in der Regel den gesamten pH-Bereich.

Die Tendenz, größere Populationen auf Standorten mit höherem pH-Wert anzutreffen, wurde auch bei Untersuchungen von Regenwürmern an 44 Standorten in Wäldern

© Naturforschende Gesellschaft zu Freiburg im Breisgau c/o Institut für Geo- und Umweltnaturwissenschaften; download www.zobodat.at

Baden-Württembergs gefunden. Die in Abb. 2 dargestellte Beziehung zwischen dem pH-Wert im Oberboden und der Größe von Regenwurmpopulationen lässt allerdings an einer linearen Abhängigkeit zweifeln. Oberhalb des Schwellenbereiches (um den Wert von pH 3,8) ist keinerlei lineare Abhängigkeit mehr zu erkennen, die Populationsgröße wird nicht mehr vom pH-Wert bestimmt (Ehrmann et al. 2002, Ehrmann 2009). Zu einer ähnlichen Aussage kam auch schon Lofs-Holmin (1986).

Die ökologischen Gruppen unterscheiden sich in ihrer Abhängigkeit vom pH-Wert des Bodens deutlich voneinander. Unterhalb eines pH-Wertes von ca. 3,8 kommen nur noch epigäische Arten vor, oberhalb dieses Schwellenwertes können auch endogäische und anezische Arten vorkommen – manchmal fehlen sie aber aus anderen Gründen.

Landwirtschaftlich genutzte Flächen weisen in Baden-Württemberg aufgrund der Düngung praktisch immer pH-Werte von über 4 auf. Daher ist in Äckern und Grünland der pH-Wert normalerweise kein differenzierender Faktor.

Tiefgrabende Regenwürmer können durch das Hochholen von weniger versauertem Unterboden den pH-Wert im Bereich Ihrer Wohnröhre anheben. Besonders ausgeprägt ist dies bei der größten tiefgrabenden Art *Lumbricus badensis* (Bild 21).

Bild 21: *Lumbricus badensis* bei der Suche nach Nahrung an der Bodenoberfläche. Neben normalen braunen Losungen sind auch hellgraue Losungen zu erkennen. Dieses Bodenmaterial stammt aus dem Unterboden.

© Naturforschende Gesellschaft zu Freiburg im Breisgau c/o Institut für Geo- und Umweltnaturwissenschaften; download www.zobodat.at

5.1.4 Tongehalt bzw. Bodenart

Der direkte physikalische Einfluss der Bodenart auf Regenwurmpopulationen ist nur schwer vom Einfluss der Faktoren Bodenfeuchte und pH-Wert zu trennen. So ist eine grobe Textur häufig mit Trockenheit (wegen geringer Wasserspeicherkapazität) und einer schnellen Versauerung verknüpft.

Als mögliche direkte physikalische Auswirkung der Bodenart vermuten Römbke et al. (1997) den abrasiven Einfluss von Sandkörnern und groben Partikeln. Baltzer (1956) ist dagegen der Meinung, die groben Bestandteile des Bodens zeigten keine negative Auswirkung auf Regenwürmer. Eine weitere direkte Wirkung könnte in der geringen Aggregatstabilität sehr tonarmer Gemenge zu suchen sein. Besonders anezischen Regenwürmern könnte es in solchen Substraten schwer fallen, dauerhaft stabile Röhrensysteme anzulegen.

An 44 Waldstandorten in Baden-Württemberg wurde keine signifikante Korrelation zwischen dem Tongehalt und der Gesamtbiomasse gefunden (Abb. 3). Allerdings kamen keine tiefgrabenden Regenwürmer an Standorten mit weniger als 17 % Tongehalt des Bodens vor. An sandigen Standorten (< 10 % Ton) wurden auch wegen des dort niedrigen pH-Wertes nur epigäische Arten gefunden (Ehrmann et al. 2002).

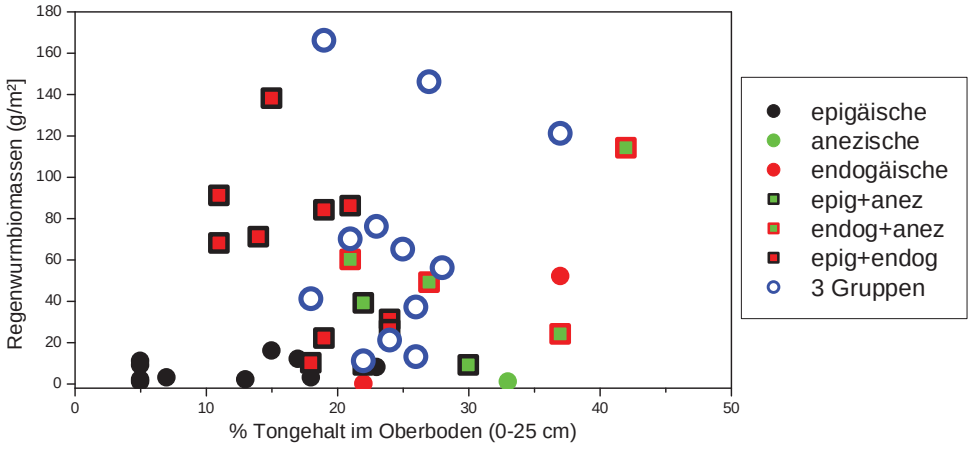


Abb. 3: Gesamtbiomasse in Abhängigkeit vom mittleren Tongehalt im Oberboden (EHRMANN et al. 2002, verändert). **Fig. 3:** total earthworm biomass, depending on the average clay content in the topsoil (EHRMANN et al. 2002, modified).

© Naturforschende Gesellschaft zu Freiburg im Breisgau c/o Institut für Geo- und Umweltnaturwissenschaften; download www.zobodat.at

Das Fehlen anezischer Arten in Böden mit Tongehalten < 17 % könnte in der geringen Stabilität der Wohnröhren dieser Arten in solchen Substraten begründet sein. Allerdings fanden Nordström & Rundgren (1974) bei Untersuchungen in Schweden selbst in Böden mit Tongehalten < 5 % (0–60 cm) noch anezische Arten (*L. terrestris* und *A. longa*). Tiefgrabende Arten können mit ihren Röhren Tiefen bis zu mehreren Metern erschließen und dort Baumaterial zur Stabilisierung ihrer Röhren aufnehmen. Möglicherweise kommen an den in der oben genannten Untersuchung bearbeiteten Standorten im Unterboden Horizonte mit höheren Tongehalten vor, die den tiefgrabenden Arten zugänglich sind (darüber werden keine Angaben gemacht).

5.2 Modell für das Vorkommen von Regenwürmern in Wäldern Baden-Württembergs

Auf der Ebene der ökologischen Gruppen lässt sich für Wälder Baden-Württembergs ein Modell des Vorkommens basierend auf pH-Wert und Bodenfeuchte erstellen (Abb. 4):

- An Standorten mit einem pH-Wert < 3,8 (gemessen in 0,01m $CaCl_2$) im Oberboden kommen nur epigäische Arten vor.
- Anezische Arten fehlen zusätzlich an allen nassen und an besonders trockenen Standorten. Bei klüftigem Kalkgestein können sie aber auch an trockenen Standorten vorkommen.
- In einem mittleren Bereich der Bodenfeuchte bei einem pH-Wert > 3,8 können prinzipiell alle drei ökologischen Gruppen vorkommen. In tonarmen Böden fehlen aber anezische Regenwürmer.

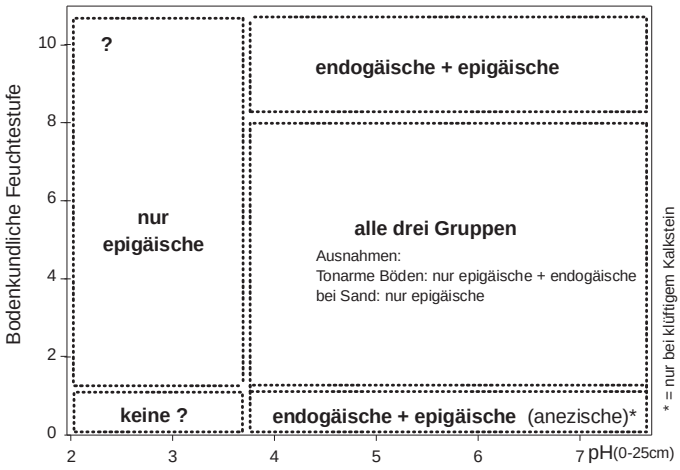


Abb.4: Modell für das Vorkommen von Regenwürmern in Wäldern (EHRMANN et al. 2002). **Fig. 4:** Model for the presence of earthworms in forests (EHRMANN et al. 2002).

© Naturforschende Gesellschaft zu Freiburg im Breisgau c/o Institut für Geo- und Umweltnaturwissenschaften; download www.zobodat.at

5.3 Einfluss der Bewirtschaftung auf Regenwurmpopulationen

5.3.1 Vergleich von Acker, Grünland und Wald

Die besten Böden Baden-Württembergs sind unter Ackernutzung. Die größten Regenwurmabundanzen und -biomassen findet man aber im Grünland. Dort ist die Anzahl und Biomasse der Regenwürmer ungefähr doppelt so hoch wie im Acker oder im Wald (Abb. 5). Landwirtschaftlich genutztes Grünland wird gedüngt – der pH Wert ist dadurch im günstigen Bereich, aber es wird im Gegensatz zum Acker weitestgehend auf Bodenbearbeitung und Pestizideinsatz verzichtet. Beide Bedingungen treffen zwar auch für Wälder zu und die anfallende Streumenge ist aufgrund der fehlenden Abfuhr in Wäldern sogar noch größer, aber viele Waldböden sind versauert und oft wurde Wald auf landwirtschaftlich nicht nutzbaren Standorten abgedrängt. Daher sind relevante Bodeneigenschaften (pH-Wert, Wasserhaushalt) in Wäldern oft ungünstiger für Regenwürmer als in Acker oder Grünland. Zudem ist die Evapotranspiration von Wald höher als die von Acker oder Grünland, so dass die Böden im Mittel zumindest an niederschlagsarmen Standorten trockener sind.

Das Vorkommen der drei ökologische Gruppen ist auch unterschiedlich: Epigäische Arten kommen selten im Acker vor (nur an 27% der Standorte), häufiger im Grünland (62%) und fast immer im Wald (87%). Endogäische Arten kommen an fast allen Acker- (97%) und Grünlandstandorten (100% außer den beiden Golfplätzen) vor. Im Wald kommen sie wegen der Versauerung nur an 67% der Standorte vor. Anezische Arten kommen an 71% aller Acker- und 74% aller Grünlandstandorte, aber nur in 40% aller Wälder vor.

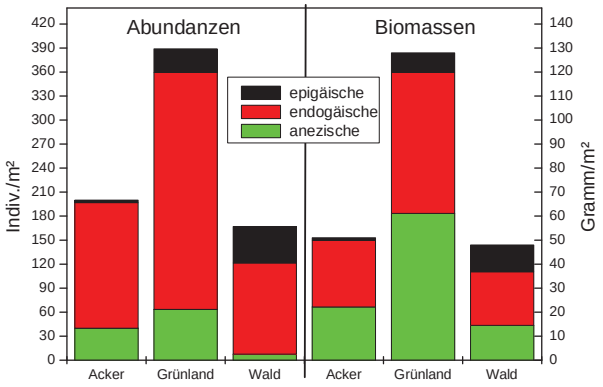


Abb. 5: Vergleich der Regenwurmabundanzen und -biomassen von Acker, Grünland und Wald in Baden-Württemberg (EHRMANN 2008).
Fig. 5: Comparison of earthworm numbers and biomasses of arable field, grassland and forest in Baden-Württemberg (EHRMANN 2008).

© Naturforschende Gesellschaft zu Freiburg im Breisgau c/o Institut für Geo- und Umweltnaturwissenschaften; download www.zobodat.at

5.3.2 Einfluss der Bewirtschaftung im Ackerbau

Aufgrund von Standortsunterschieden und vor allem aufgrund unterschiedlicher Bewirtschaftung gibt es in Äckern Baden-Württembergs sehr unterschiedliche Regenwurmpopulationen (Abb. 6). Relevant sind dabei vor allem die folgenden Faktoren:

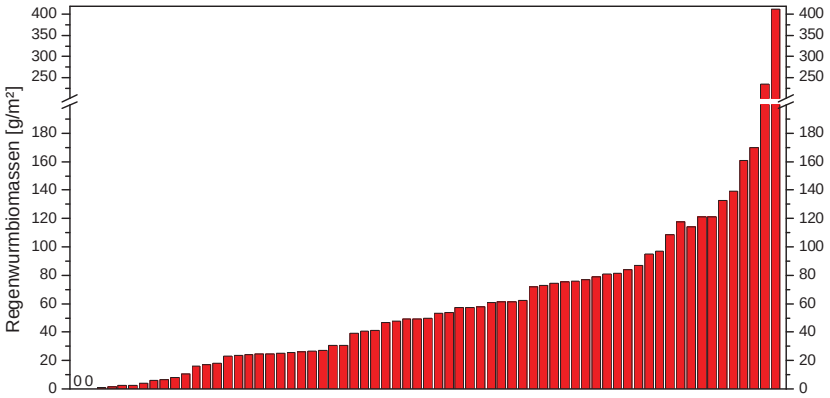


Abb. 6: Zusammenstellung der Regenwurmbiomassen von Ackerböden in Baden-Württemberg (67 verschiedene Standorte, davon 7 Direktsaatflächen; Zeitraum 1989 – 2011). Die größte Regenwurmbiomasse wurde in einem Luzerneschlag auf Löss (413 g m^{-3}) gefunden. Zwei erodierte Pararendzinen aus Löss wiesen keine Regenwürmer auf (Ehrmann 2015). **Fig. 6:** Compilation of earthworm biomass from arable soils in Baden-Württemberg (67 different locations, including 7 fields with direct drilling during the period 1989-2011). The largest earthworm biomass was found in an alfalfa-field (413 g m^{-3}, soil: luvisol). Two heavily eroded fields showed no earthworms (Ehrmann 2015).

a) Bodenbearbeitung

Bodenbearbeitung führt in aller Regel zu einer direkten Schädigung von Regenwürmern und zu einer Zerstörung ihrer Bauten. Der negative Effekt lässt sich direkt nach der Bodenbearbeitung feststellen. Krüger (1952) ermittelte, dass tiefes Fräsen bei feuchtem Boden die stärkste Wirkung hatte. Die negative Wirkung lässt sich aber auch indirekt durch wesentlich mehr Regenwürmer bei Direktsaatflächen im Vergleich zu gepflügten Flächen zeigen (z.B. Barnes & Ellis 1979, Edwards 1980, in Baden-Württemberg: Ehrmann 2015, siehe Abb. 7).

© Naturforschende Gesellschaft zu Freiburg im Breisgau c/o Institut für Geo- und Umweltnaturwissenschaften; download www.zobodat.at

Die relativ großen anezischen Regenwürmer leiden besonders unter einer Bodenbearbeitung. Leider ziehen sie sich oft nicht schnell genug in den Unterboden zurück und werden dann verletzt oder getötet. Außerdem wird durch eine Bodenbearbeitung die von ihnen an der Oberfläche gesammelte Nahrung wieder zerstreut oder in den Boden eingemischt. Vermieden werden sollte:

- eine Bodenbearbeitung bei feuchtem Boden (die Regenwürmer sind dann nahe der Oberfläche)
- eine tiefe Bodenbearbeitung
- eine intensive Bearbeitung mit Fräse oder Kreiselegge

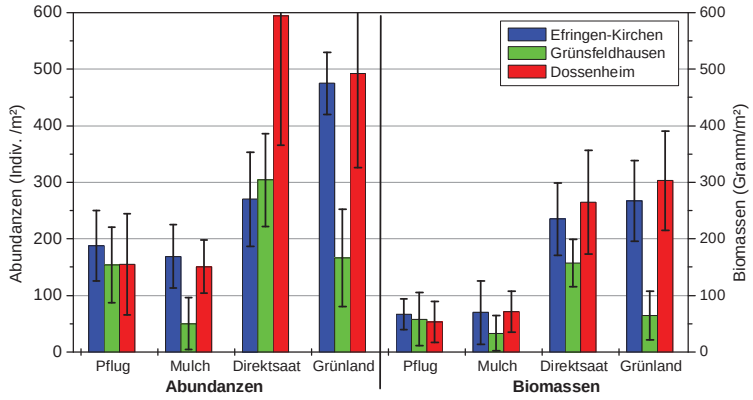


Abb. 7: Vergleich verschiedener Bodenbearbeitungsverfahren: Regenwurmpopulation bei Pflugeinsatz, Mulchsaat und Direktsaat an drei verschiedenen Standorten in Baden-Württemberg (EHRMANN 2015).
Fig. 7: Comparison of different tillage methods: earthworm population at ploughing, mulch-till and direct drilling at three different locations in Baden-Württemberg (EHRMANN 2015).

b) Nahrungsquellen, Düngung und pH-Wert

Mulchsaatverfahren und vor allem eine **Direktsaat** ohne Bodenbearbeitung sorgen dafür, dass Ernterückstände nicht vergraben werden, sondern dass ein Teil (bei Mulchsaat) oder die gesamten oberirdischen Ernterückstände (bei Direktsaat) an der Bodenoberfläche verbleiben. Damit wird für die tiefgrabenden Regenwürmer eine wichtige Nahrungsquelle gesichert.

Organischer Dünger wirkt sich in aller Regel positiv auf Regenwürmer aus. Völlig unproblematisch in der Anwendung und daher immer günstig für Regenwürmer ist Stallmist und anderer fester organischer Dünger (Satchell 1967). Gülle in hohen Mengen kann für Regenwürmer jedoch schädigend sein (Curry 1976, Bauchhenss 1981). Davon betroffen sind insbesondere die tiefgrabenden Arten, wenn ihre Röhren mit Gülle voll-

© Naturforschende Gesellschaft zu Freiburg im Breisgau c/o Institut für Geo- und Umweltnaturwissenschaften; download www.zobodat.at

laufen. Daher werden immer wieder tote tiefgrabende Regenwürmer nach einer Gülleausbringung an der Bodenoberfläche gefunden (eigene Beobachtungen).
Mineralische Dünger erhöhen die Phytomasse und somit auch das Nahrungsangebot. Manche Mineraldünger (z. B. Ammoniumsulfat) senken allerdings den pH-Wert und wirken so ohne Kompensationskalkung langfristig negativ auf Regenwürmer (Ma et al. 1990).

In Wäldern sind niedrige pH-Werte der Hauptgrund für das Fehlen von Regenwurmarten. Unterhalb eines pH-Wertes von ca. 4 (in CaCl2 gemessen) fallen zahlreiche Arten aus. In Äckern werden solch niedrige pH-Werte selten erreicht und können nötigenfalls auch durch eine Kalkung leicht wieder erhöht werden.

c) Pflanzenschutzmittel

Zwar sind Pflanzenschutzmittel, die sich offensichtlich deutlich negativ auf Regenwürmer auswirken, wie z. B. das hochtoxische Benomyl, das die Population von *L. terrestris* in Obstanlagen drastisch verminderte (Niklas 1980), mittlerweile weitgehend vom Markt verschwunden oder werden wie das ebenfalls für Regenwürmer toxische Kupfer (Niklas 1980) in verminderten Aufwandmenge eingesetzt (Stumpf et al. 2015). Die derzeitige Zulassungspraxis ist aber nicht darauf ausgelegt, auch geringere (subletale) Wirkungen bzw. Kombinationseffekte unterschiedlicher Pflanzenschutzmittel aufzuzeigen. Durch die Vielzahl der eingesetzten Pflanzenschutzmittel sind dann doch negative Auswirkungen auf Regenwürmer zu befürchten. Auch sind insgesamt die Pestizide nicht hinreichend untersucht. So wurden z. B. bei dem weltweit am häufigsten eingesetzten Herbizid Glyphosat bei erhöhten Aufwandmengen (3,5-fach höher als im Ackerbau erlaubt) deutliche Nebenwirkungen auf Regenwürmer festgestellt (Gaupp-Berghausen et al. 2015).

d) Verdichtung

Bodenverdichtungen in stärkerem Ausmaß sind ungünstig für Regenwürmer (Pizl 1992, Ehrmann et al. 1996), weil sie die Bauten zerstören und die Tiere direkt beeinträchtigen. Außerdem verringern Verdichtungen die Wasserspeicherfähigkeit des Bodens.

Regenwürmer können sich aber durch die Kombination von Fressen und wegdrücken – die Regenwürmer fressen zuerst eine kleine Röhre frei und drücken von dieser aus den umgebenden Boden weg - auch durch dichtere Bereiche von Böden graben (Bild 22). Allerdings graben Regenwürmer nur geringe Volumina des Unterbodens um (Abb. 13) und meiden dabei nach Möglichkeit verdichtete Bereiche. Ein stark verdichteter Unterboden wird daher selbst bei einer hohen Regenwurmpopulation sehr lange (vermutlich >100 Jahre) in den meisten Bereichen verdichtet bleiben. Die Regenwürmer verbessern jedoch durch ihre tiefreichenden Röhren die Infiltration und Durchlüftung des verdichteten Bodens.

© Naturforschende Gesellschaft zu Freiburg im Breisgau c/o Institut für Geo- und Umweltnaturwissenschaften; download www.zobodat.at

Bild 22: Regenwürmer haben eine Fahrspur gelockert.

e) Fruchtfolge

Die günstigsten Kulturen für Regenwürmer sind Dauergrünland (Abb. 5) und mehrjähriges Feldfutter (z. B. Luzernegras, Abb. 8), da der Boden überhaupt nicht bzw. nur zur Ansaat bearbeitet wird und in diesen Kulturen praktisch keine Pflanzenschutzmittel eingesetzt werden. Besonders ungünstig ist der Daueranbau von Silomais, da bei Silomais nur wenig Ernterückstände auf dem Acker bleiben und diese zudem aufgrund eines weiten C/N-Verhältnisses keine gute Nahrung für Regenwürmer sind. Außerdem ist die Bodenerosion bei Silomais an vielen Standorten erheblich und durch die schweren Erntefahrzeuge wird der Boden zudem in feuchten Jahren stark verdichtet. Leider wurde in den letzten Jahrzehnten der Luzerneanbau zugunsten von Silomais weitgehend eingestellt.

f) Struktur der Agrarlandschaft

Feldraine weisen meist arten- und individuenreichere Regenwurmpopulationen als Äcker auf (Ehrmann 1994). Von dort aus können Äcker nach ungünstiger Bewirtschaftung wieder besiedelt werden. Aufgrund der geringen Wanderungsgeschwindigkeit von Regenwurmpopulationen (5 - 10 m/a, Marinissen 1992) kann die Wiederbesiedlung eines großen Schlages sehr lange dauern. Daher sind große Schläge aus bodenbiologischer Sicht ungünstig, insbesondere wenn ihr Wasserhaushalt durch Entwässerungsmaßnahmen weitgehend nivelliert wurde.

Besonders dramatisch kann sich eine Flurbereinigung in hügeligen Lösslandschaften auswirken. Untersuchungen einer flurbereinigten (Friesentaler Grund) und einer angrenzenden nicht flurbereinigten Landschaft (Klumpbrunnen) im Kraichgau zeigten, dass in der flurbereinigten Landschaft tiefgrabende Regenwürmer vollständig fehlten, in der nicht flurbereinigten kamen sie vor allem an der Unterseite von Lössterrassen

© Naturforschende Gesellschaft zu Freiburg im Breisgau c/o Institut für Geo- und Umweltnaturwissenschaften; download www.zobodat.at

noch vor (Abb. 9). Nachteilig war nicht nur das Verschwinden der unbearbeiteten Lössterrassen als wenig gestörte Rückzugsräume, sondern auch die extrem hohe Erosion, weil die Äcker nach der Flurbereinigung steiler und größer waren. Dadurch gab es auf der Kuppe nur noch tonarmen Rohlöss und der tonigere Boden in der Senke wurde mit tonärmerem Boden von der Kuppe überdeckt. Dadurch wurden auch die Kolluvien in den Senken als Lebensraum für tiefgrabende Regenwürmer ungeeignet.

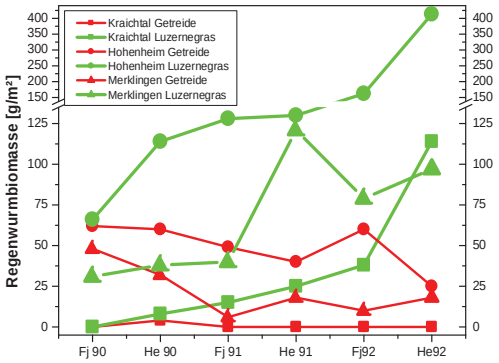


Abb. 8: Entwicklung der Regenwurmbiomasse bei Luzernegras im Vergleich zu einer Getreidefruchtfolge von Frühjahr 1990 bis Herbst 1992 an drei verschiedenen Standorten in Baden-Württemberg. (EHRMANN 1996). **Fig. 8:** Development of earthworm biomass in alfalfa compared to a cereal crop cycle from spring 1990 to autumn 1992 at three different locations in Baden-Württemberg. (EHRMANN 1996).

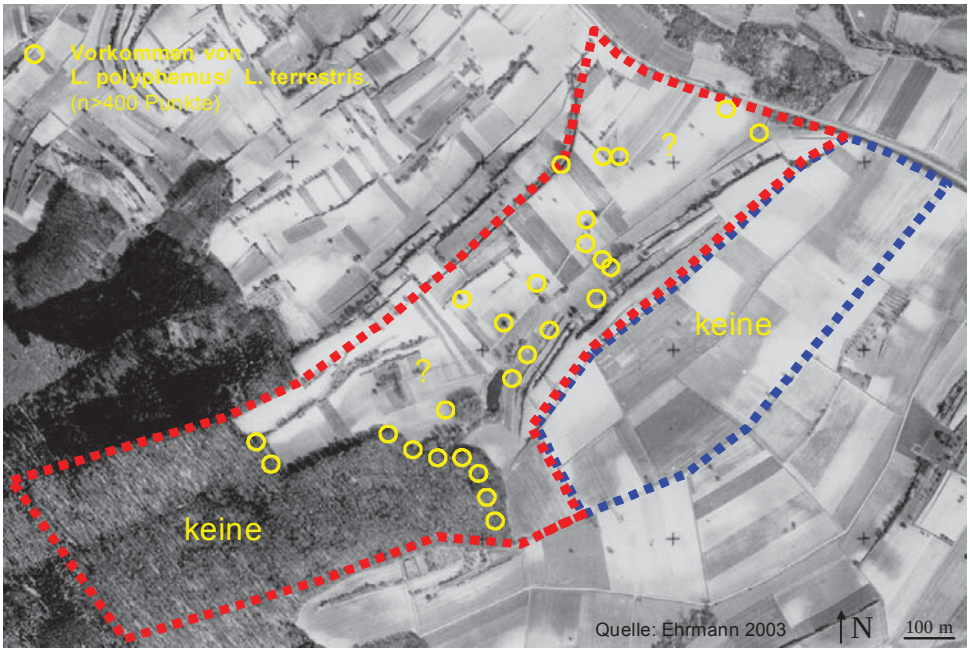


Abb. 9: Vorkommen von anezischen Regenwurmarten in zwei benachbarten Seitentälern der Kraich (oben rechts im Bild). Der „Friesentaler Grund“ (blau umrandet) wurde mehr als 30 Jahren vor der Untersuchung flurbereinigt, im „Klumpbrunnen“ (rot umrandet) sind noch relativ viele Lössterrassen zu finden (EHRMANN 2003). **Fig. 9:** Occurrence (marked with yellow circles) of anecic earthworm species in two adjacent side valleys of the river Kraich (upper right). In the „Friesentaler Grund“ (outlined in blue)) loess terraces have been removed more than 30 years prior to the examination, in the „Klumpbrunnen“ (outlined in red) loess terraces are still found (EHRMANN 2003).

© Naturforschende Gesellschaft zu Freiburg im Breisgau c/o Institut für Geo- und Umweltnaturwissenschaften; download www.zobodat.at

6. Einfluss der Regenwürmer auf Nährstoffhaushalt und Bodengefüge

Regenwürmer können das Gefüge des Bodens vor allem verändern durch:
- Einmischung von organischer Substanz in den Boden.
- Regenwurmlosungen (Neuvermischung von organischer und mineralischer Substanz im Regenwurmdarm, Ablage als Losung). Wenn die Losung an der Bodenoberfläche abgelegt wird, dann wir der Boden auch gelockert.
- Anlage von tiefreichenden Röhren.

6.1 Einmischung von organischer Substanz in den Boden

Regenwürmer ernähren sich von vorzersetzter organischer Substanz, wobei die darin lebenden Mikroorganismen vermutlich einen Teil der Nahrung ausmachen (Lee 1985). Sie fressen in der Regel keine lebenden Pflanzenteile oder frisch gefallene Streu.

An vielen Standorten sammeln tiefgrabende Regenwürmer die oberirdische Streu (Bild 23) zu kleinen Häufchen an der Mündung ihrer Wohnröhre. In den Streuhäufchen und im Boden sind die Bedingungen für Mikroorganismen aufgrund der gleichmäßigeren Feuchte günstiger als bei loser Lagerung der Blätter an der Bodenoberfläche. Erst nach einer mikrobiellen Vorzersetzung werden die Blätter gefressen.

Da Streu meist nährstoffarm ist und weil die Regenwürmer keine effektiven Kauwerkzeuge haben, wird ein großer Teil der organischen Substanz wieder ausgeschieden. Regenwürmer verwerten z. B. bei der relativ schwer abbaubaren Buchenstreu bei einer einmaligen Darmpassage nur ca. 5 % des Kohlenstoffs (Schaefer 1989). In den Losungen erkennt man oft noch größere Pflanzenreste (Bild 26). Nach einer weiteren mikrobiellen Vorzersetzung wird die Regenwurmlosung wieder von Regenwürmern oder anderen Bodentieren gefressen.

Regenwürmer können bei entsprechender Populationsgröße die anfallende Pflanzenstreu bis zum nächsten Streufall praktisch vollständig in den Boden einarbeiten und sie so schneller mineralisieren helfen. Dadurch stehen die Nährstoffe der Vegetation schneller wieder zur Verfügung (=>Humusform). Von Satchell (1967) wurde berechnet, dass im Wald eine *Lumbricus terrestris*-Population die gesamte Laubmenge eines Jahrganges einmischen kann.

Das Einmischen vermindert auch die Infektionsgefahr durch Pilzkrankheiten. Dies kann z. B. im Ackerbau bei Fusarien bei engen Fruchtfolgen eine Rolle spielen (Schrader & Wolfarth 2011). Niklas (1980) stellte fest, dass infolge der zügigen Einarbeitung der Blätter von Obstbäumen durch *Lumbricus terrestris* ein hoher Anteil an phytopathogenen Pilzen vernichtet wird. Stephens et al. (1997) fanden eine deutliche Reduktion des Befalls mit *Rhicotonia solani* bei Grünlandpflanzen in Anwesenheit von Regenwürmern.

© Naturforschende Gesellschaft zu Freiburg im Breisgau c/o Institut für Geo- und Umweltnaturwissenschaften; download www.zobodat.at

Die einmischende Tätigkeit der Regenwürmer ist überall dort, wo keine Bodenbearbeitung stattfindet (Wald, Grünland und Äcker mit Direktsaat) besonders relevant. In Wäldern korrelieren der Streuabbau und damit auch die Humusform eindeutig mit dem Vorkommen von Regenwürmern. Untersuchungen von Regenwurmpopulation und Humusform an über 40 Waldstandorten in Baden-Württemberg (Ehrmann et al. 2002) zeigten:

Bild 23: Regenwürmer haben die vom nahen Waldrand eingewehten Buchenblätter zu ihrer Röhrenmündung gezogen. Die Streuhäufchen kommen an diesem Standort flächendeckend vor.

a) Die größten Regenwurmpopulationen fanden sich an Standorten mit den Humusformen L und F(+)-Mull, Anmoor und vererdetem Niedermoor (Abb. 10, dort sind auch die Humusformen erläutert). Es kamen meist alle drei ökologischen Gruppen vor, endogäische Regenwürmer hatten die höchsten Anteile an der Gesamtbiomasse. Der Unterschied zu den anderen Humusformen war sehr deutlich.
b) Bei Rohhumus, Hochmoor und Moder kamen praktisch nur epigäische Arten vor (Ausnahme: Moder an sehr trockenen Standorten).
c) Bei F(-)-Mull und mullartigem Moder kamen an einigen Standorten auch noch endogäische oder anezische Arten vor, die Biomasse war aber viel geringer als bei den Standorten unter a).

Die Humusformen von Wäldern sind von den gleichen Standortsfaktoren wie die Regenwürmer abhängig (Abb. 11). Die mit wenig Aufwand im Gelände bestimmbare Humusform kann daher zu einem gewissen Grad zur Prognose der Größe und Struktur von Regenwurmpopulationen verwendet werden. Allerdings sind die Regenwürmer nicht an bestimmte Humusformen gebunden, sondern günstige Standortsbedingungen für endogäische und anezische Regenwürmer ermöglichen das Vorkommen großer und aktiver Populationen dieser Artengruppen, die dann durch ihre Tätigkeit die Bildung günstiger Mineralbodenhumusformen bewirken (Bernier & Ponge 1994, Judas 1989).

© Naturforschende Gesellschaft zu Freiburg im Breisgau c/o Institut für Geo- und Umweltnaturwissenschaften; download www.zobodat.at

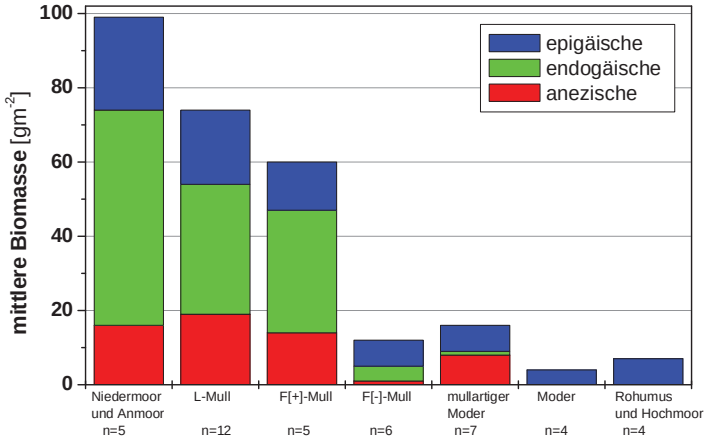


Abb. 10: Regenwurmbiomassen und Humusformen an 43 Waldstandorten in Baden-Württemberg Beim L-Mull, Anmoor und vererdetem Niedermoor wird die Streu innerhalb eines Jahres in den Mineralboden eingemischt und weitgehend abgebaut. Es liegt höchstens die Streu vom letzten Blattfall auf der Bodenoberfläche. Beim Rohhumus unterbleibt die Einmischung von Streu in den Mineralboden vollständig, der Streuabbau ist viel langsamer und unvollständiger als beim L-Mull. Die Streu akkumuliert auf der Mineralbodenoberfläche. Die anderen Humusformen liegen in ihrer Ausprägung dazwischen (genauere Beschreibung siehe AG Boden 2005). Der F-Mull wurde aufgrund von Mächtigkeit und Ausprägung des Ah-Horizonts in eine günstige (F+ = krümeliger Ah >10 cm) und ungünstige Form (F-) unterteilt (Ehrmann et al. 2002). **Fig. 10**: Earthworm biomass and humus forms at 43 forest sites in Baden-Württemberg. At L-Mull, Anmoor and drained fen the litter is mixed within a year in the mineral soil. At the raw humus the litter decomposition is much slower and incomplete compared to the L-Mull. The litter accumulated on the mineral soil surface. The other humus forms are in between. The F-Mull was divided due to thickness and characteristics of the Ah horizon in a favorable (F(+), Ah> 10 cm) and unfavorable shape (F(-)), Ehrmann et al. 2002).

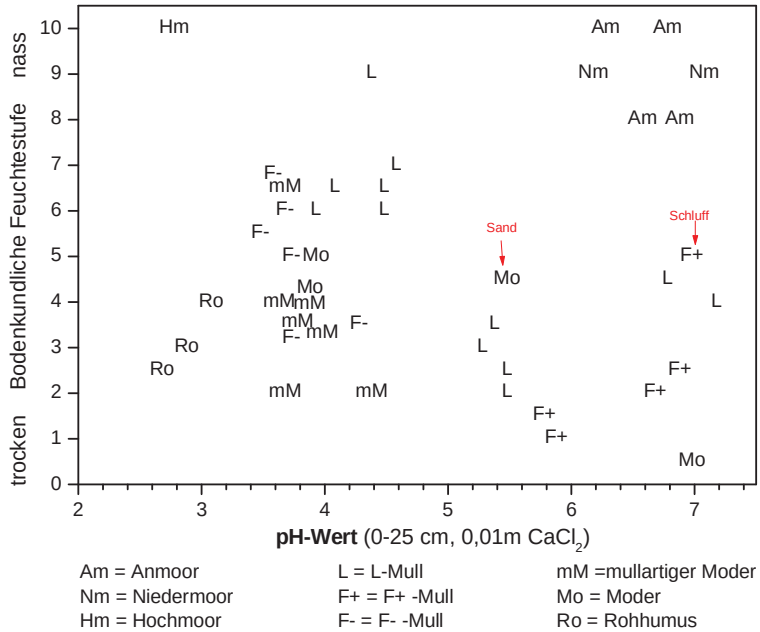


Abb. 11: Zusammenhang zwischen Humusformen, pH-Wert (0-25cm) und BodenkundlicherFeuchtestufe. **Fig. 11:** Relationship between humus forms, pH (0-25cm) and soil moisture.

© Naturforschende Gesellschaft zu Freiburg im Breisgau c/o Institut für Geo- und Umweltnaturwissenschaften; download www.zobodat.at

6.2 Regenwurmlosungen

Regenwürmer können im Darm den aufgenommenen Boden zum Teil (Schrader 1993) oder ganz (Barois et al. 1993) dispergieren. Sie vermischen ihn während der Darmpassage und verdichten ihn bei der Losungsablage (Bild 25, Barois et al. 1993). Durch die Vermischung wird die Bildung von Ton-Humus-Komplexen ermöglicht (Shaw & Pawluk 1986). Die Darmpassage hat Einfluss auf den Abbau der organischen Substanz: Martin (1991) stellte in Regenwurmlosungen kurzfristig eine höhere, langfristig eine deutlich geringere C-Mineralisierung als im ansonsten gleichen Bodenmaterial fest. Es erfolgt also durch die Passage im Regenwurmdarm eine Stabilisierung der organischen Substanz und damit eine Erhöhung des Humusgehaltes.

Die Losungen haben andere physikalische und chemische Eigenschaften als der umgebende Boden; sie haben in der Regel eine höhere Gefügestabilität als künstliche Aggregate (Schrader 1993). Die Stabilität der Losungen ist aber im frischen Zustand geringer als nach einigen Wochen. Marinissen & Dexter (1990) führten diese allmähliche Erhöhung der Stabilität auf die Aktivität von Pilzen und Bakterien und auf wiederholte Zyklen von Austrocknung und Wiederbefeuchtung zurück. Losungen sind oft reicher an organischer Substanz, Stickstoff, Phosphor und Kalium als der umgebende Boden (Graff 1970) und weisen außerdem eine höhere mikrobielle Aktivität auf (Übersicht bei Lee 1985).

Die Losungen können an der Bodenoberfläche (Bild 2, Bild 21) oder im Mineralboden abgelegt werden. Bei einer Losungsablage an der Bodenoberfläche lockern die Regenwürmer den Boden (Graff 1971). Endogäische Arten legen die Losungen meist im Mineralboden ab, anezische Arten in der Regel an der Bodenoberfläche oder sie kleiden ihre Wohnröhre damit aus. Die Losungen von kleinen epigäischen Arten findet man in der Regel in den obersten Zentimetern der Humusauflage, größere Arten wie *L. rubellus* legen auch Losungen an der Bodenoberfläche ab. Die Losungen von manchen Arten haben eine charakteristische Form, anhand derer man daher oft das Vorkommen einer Art oder einer ökologischen Gruppe kartieren kann.

Die Losungsmenge an der Bodenoberfläche kann durch Absammeln relativ einfach und ohne große Störung ermittelt werden. Sie kann an für Regenwürmer günstigen Standorten im Jahr bei mehreren kg/m² liegen (Sharpley et al. 1979, Glasstetter 1991). Die Erfassung der Losungsablage im Boden ist im Gelände schwieriger, weil das Alter der Losung in der Regel unbekannt ist, daher kann dies einfacher an homogenisierten Laborböden untersucht werden. Schrader (1993) ermittelte in Laborversuchen für *A. longa* Werte von 1,2 g TM Losung /g FM Tier am Tag und für *A. caliginosa* Werte von 2,3 g. Dies würde - gerechnet mit einem Mittelwert von 1,75 g - bei einer Regenwurmpopulation von 100 g /m² und 200 Tage Aktivität einen Umsatz von 35 kg Boden im Jahr bedeuten. Obwohl die Werte von Schrader im mittleren Bereich von Laborversuchen liegen, sind sie vermutlich zu hoch, weil der Boden bei

© Naturforschende Gesellschaft zu Freiburg im Breisgau c/o Institut für Geo- und Umweltnaturwissenschaften; download www.zobodat.at

Laborversuchen gestört wird und Regenwürmer ja erst ein Gangsystem anlegen müssen und daher besonders viel graben. Aber auch wenn man nur mit 20 kg/m² rechnet, so zeigt sich immer noch der große Einfluss der Regenwürmer auf die Bodenstruktur. Ein Oberboden von 20 cm Mächtigkeit wird bei einer Dichte von 1,2 g/cm³ und mittlerer Regenwurmpopulation theoretisch alle 12 Jahre den Regenwurmdarm passiert haben.

Die gesamten im Boden vorhandenen Losungen kann man in ungestörten Dünnschliffproben erfassen. Bei dieser Vorgehensweise ist das Alter der Losung unbekannt, man ermittelt nicht die Produktion, sondern in welchem Ausmaß die Regenwürmer die Bodenstruktur insgesamt prägen. Dabei hat nicht nur die Produktion, sondern auch die Haltbarkeit der Losungen einen wesentlichen Einfluss auf das Ergebnis.

Pararendzina aus Geschiebemergel, (pH 7,2, Bodenart toniger Lehm, Humusform Mull)

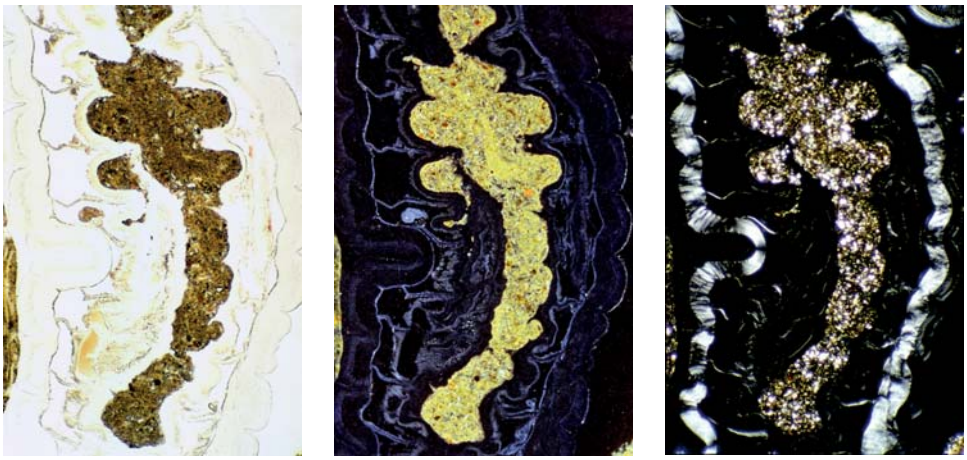
162 Regenwürmer mit 66 g Biomasse je m²

Pseudogley aus Löss über Lettenkeuper, (pH 3,7, schluffiger Lehm Humusform Moder)

21 Regenwürmer mit 11 g Biomasse je m²

Bild 24: Extremes Beispiel für den Gefügeeinfluss von Regenwürmern (Bildhöhe jeweils 25 cm). Im versauerten Pseudogley (rechts) gibt es insgesamt wenig Regenwürmer und tiefgrabende Arten fehlen ganz. Der Einfluss der Regenwürmer beschränkt sich auf eine Tiefe von wenigen cm. Der Boden ist dicht, die zahlreichen dunklen Eisenkonkretionen weisen auf Luftmangel hin. In der noch kalkhaltigen Pararendzina (links) bestehen die obersten 25 cm praktisch vollständig aus Regenwurmlosungen. An diesem Standort sind sie auch wegen des hohen Kalkgehaltes ungewöhnlich stabil. Der Oberboden weist daher ein sehr günstiges Gefüge auf.

© Naturforschende Gesellschaft zu Freiburg im Breisgau c/o Institut für Geo- und Umweltnaturwissenschaften; download www.zobodat.at



Die Bilder 25a, 25b und 25 c zeigen jeweils den gleichen Längsschnitt (Bildhöhe 5 mm) durch einen Regenwurm bei verschiedener Beleuchtung. Im linken Bild ist der Regenwurm bei normalem Durchlicht zu sehen. Der Darminhalt ist gut zu erkennen. Im mittleren Bild (Durchlicht Dunkelfeld) sieht man die Leibeshöhle sehr gut. Eine Bodenstruktur ist im Regenwurmdarm nicht mehr zu erkennen; sie wurde aufgelöst. Es zeichnen sich jedoch relativ gleichmäßig verteilt hellbraune Pflanzenreste ab. Im rechten Bild (aufgenommen mit gekreuzten Polarisationsfiltern) ist die ausgeprägte Längsmuskulatur des Regenwurms gut sichtbar. Im Darm gibt es helle Punkte; dies sind größere Mineralkörner. Mineralboden und organische Substanz werden im Verdauungstrakt des Regenwurms intensiv vermischt.

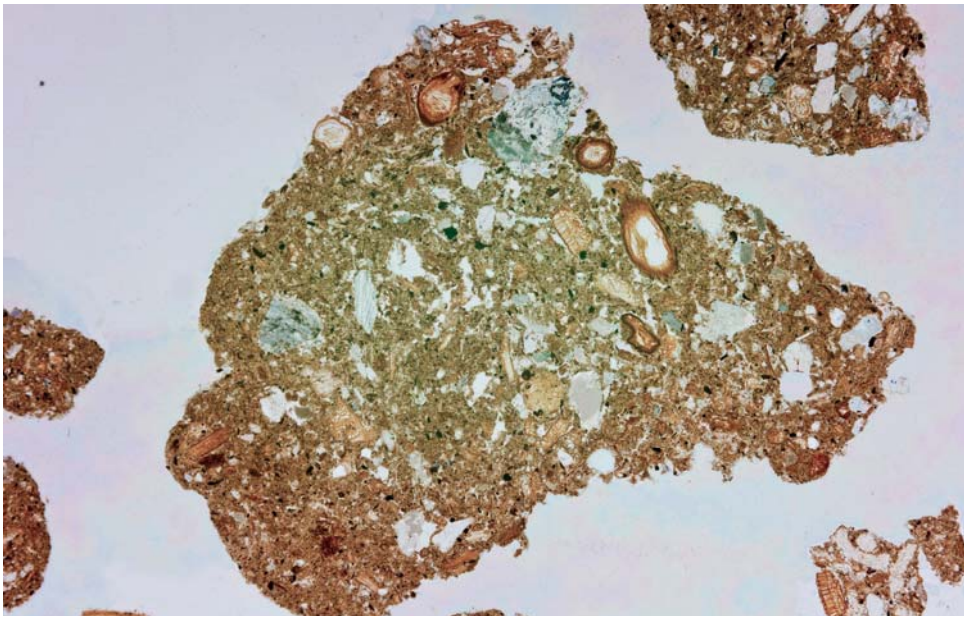


Bild 26: Regenwurmlosung (Bildbreite 3,7 mm). In der Regenwurmlosung sind relativ viele größere Pflanzenreste zu erkennen.

© Naturforschende Gesellschaft zu Freiburg im Breisgau c/o Institut für Geo- und Umweltnaturwissenschaften; download www.zobodat.at

6.2.1 Einfluss der Regenwürmer auf die Bodenstruktur im Oberboden

Die Untersuchung der Oberböden (0 - 8 cm) von 32 Waldböden in Baden-Württemberg zeigte, dass an fast allen Waldstandorten mit einem pH-Wert von ca. >4,2 (CaCl2) der Oberboden vorwiegend aus Regenwurmlosungen besteht (Abb. 12). In sauren Waldböden war der Einfluss der Regenwürmer geringer, der Anteil von Losungen anderer Tiere wie Enchyträen und Dipteren wird relativ gesehen wichtiger, absolut gesehen ist aber dann die Bioturbation geringer (Vergleich: siehe Bild 24). Die Ergebnisse lassen sich vermutlich mit Einschränkungen auch auf Grünlandstandorte übertragen; in Äckern werden die biogenen Bodenstrukturen im Oberboden regelmäßig durch Bodenbearbeitung überprägt.

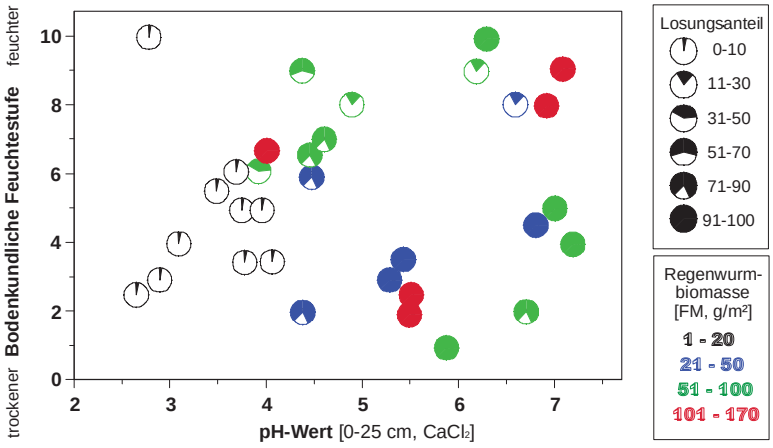
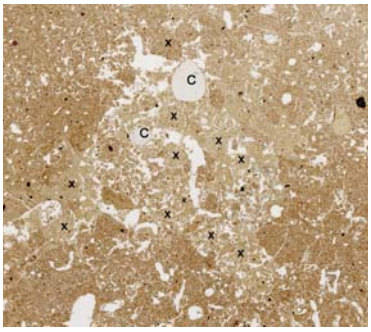


Abb. 12: Anteil der Regenwurmlosungen [%] an der Bodenfestsubstanz. Untersucht wurde der Oberboden (0 - 8 cm Tiefe) von 32 Waldböden in Baden-Württemberg. Die Farben kennzeichnen unterschiedliche Regenwurmbiomassen (EHRMANN & VOLLMER 2001). **Fig. 12:** Percentage of earthworm casts on the soil matrix. We investigated the topsoil (0 - 8 cm depth) of 32 forest soils in Baden-Württemberg. The colours indicate different earthworm biomass (EHRMANN & VOLLMER 2001)



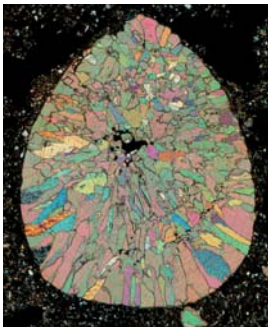


Bild 27: Regenwurmspuren in einem fossilen Lössboden. Im linken Bild (Bildbreite 25 mm) sind Regenwurmlosungen mit x und Regenwurmcalcite (Bildungen der Kalkdrüsen der Regenwürmer mit c markiert. Das rechte Bild zeigt bei gearen der beiden Regenwurmcalcite (Bildbreite 3 mm).

© Naturforschende Gesellschaft zu Freiburg im Breisgau c/o Institut für Geo- und Umweltnaturwissenschaften; download www.zobodat.at

6.2.2 Einfluss der Regenwürmer auf die Bodenstruktur im Unterboden

In Unterböden erfolgt normalerweise keine Bodenbearbeitung. Da auch Frost, Quellen und Schrumpfen sowie andere Tiere kaum einen Einfluss haben, bleiben einmal von Regenwürmern gebildete Strukturen dort sehr lange erhalten. So findet man auch noch in Böden aus der letzten Zwischeneiszeit Losungen und Röhren von Regenwürmern, Bild 27). Die Untersuchung von Bodendünnschliffen aus 61 Unterboden-Horizonten von 31 rezenten Böden Baden-Württembergs zeigte folgende Ergebnisse (Abb. 13):

- In ca. 1/3 der Horizonte (19 von 61) wurden keine Spuren der Tätigkeit von Regenwürmern gefunden.
- In einem weiteren Drittel (21 von 61) lag der Flächenanteil der Regenwurmspuren bei maximal 10 %.
- Nur in einem Drittel der Böden (21 von 61) war ein deutlicher Einfluss der Regenwürmer feststellbar. Die höchste Bioturbation wies ein schwarzerdeähnlicher Boden vom Kaiserstuhl auf (Tschernosem-Pararendzina).

Da nur 2 von 61 Unterböden einen Flächenanteil der Regenwurmspuren von über 50 % aufwiesen, ist eine hinreichende Lockerung von verdichteten Unterböden durch Regenwürmer in der Regel nicht zu erwarten.

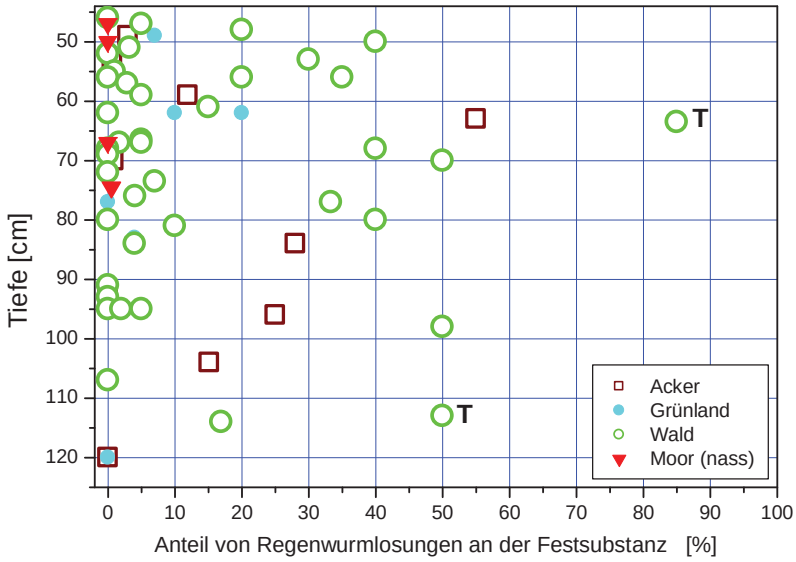


Abb. 13: Anteil von Regenwurmlosungen an der Festsubstanz des Bodens. Untersucht wurden 61 Horizonte von 31 Böden aus Baden-Württemberg (Acker, Grünland, Wald, Brache). Daten von erodierten Böden und Kolluvien wurden nicht verwendet. Mit T sind die beiden Horizonte der Tschernosem-Pararendzina vom Kaiserstuhl markiert. **Fig. 13:** Percentage of earthworm casts on the soil matrix. 61 horizons of 31 soils from Baden-Württemberg (arable fields, grasslands, forests, fallows) were examined. Data of eroded soils and Kolluvisols were not used.

© Naturforschende Gesellschaft zu Freiburg im Breisgau c/o Institut für Geo- und Umweltnaturwissenschaften; download www.zobodat.at

6.3 Regenwurmröhren - Wege für Luft, Wasser und Pflanzenwurzeln in den Unterboden

Regenwürmer können, wenn sie eine Röhre graben wollen, den Boden seitlich wegdrücken oder ihn wegfressen; oft werden beide Verfahren kombiniert (Dexter 1978). Welche Weise überwiegt, ist vor allem von der Dichte des Bodens abhängig. Einen lockeren Boden können sie wegdrücken, durch einen dichten Boden müssen sie sich mindestens teilweise durchfressen. Die Ganglänge je Regenwurm kann in einem lockeren Boden daher sehr hoch sein, in einem dichten Boden ist sie viel geringer (Joschko et al. 1989). Die Regenwurmröhren haben nicht nur für die Tiere selbst, sondern auch für den Boden wesentliche Funktionen:

a) Sie stellen Wege für Luft, Wasser und darin gelöste oder suspendierte Stoffe dar. Sie können daher die Infiltration erhöhen (Bild 29 und Ehlers 1975) und die Durchlüftung verbessern. Sie ermöglichen allerdings auch die Tiefenverlagerung von Pestiziden. Aufgrund von Sorption an der humusreichen Wand ist diese Verlagerung aber viel geringer als bei künstlichen Röhren (Edwards et al. 1992).
b) Sie stellen Wege für andere Organismen dar. Marinissen & Bok (1988) fanden in Böden mit Regenwurmröhren größere Collembolenarten als in Böden ohne Röhren. Die Röhren erleichtern auch Pflanzenwurzeln das Vordringen in den Unterboden (Bild 29). Die humusreiche Wandtapete der Röhren von *L. terrestris* ist für Pflanzen eine beträchtliche und leicht erschließbare Nährstoffquelle (Graff 1971).

Die von den Regenwürmern angelegten Röhren sind von der Art bzw. der ökologischen Gruppe abhängig:
a) Typische anezische Arten wie z.B. *L. badensis, L. polyphemus* (Lamparski et al. 1987) und *L. terrestris* (Wilcke 1953) haben eine ± vertikal orientierte Wohnröhre mit einer oder mehreren Mündungen an der Bodenoberfläche. Dort sammeln sie Streu und ziehen sie in den Boden. Die Röhren haben einen großen Durchmesser (> 7 mm), meist eine Wandauskleidung (diese verbessert die Haltbarkeit) und können mehrere Meter in die Tiefe reichen (Nielsen & Hole 1964). Untersuchungen in Baden-Württemberg ergaben, dass die Röhren von *Lumbricus terrestris* meist ca. 120 - 150 cm tief sind. Deutlich tiefer (250 cm) reichen die Röhren der wesentlich größeren Art *Lumbricus badensis* in den Unterboden (Lamparski 1985). Die Ursache für die Anlage von so tiefen Röhren durch *L. badensis* ist unklar, da im Hochschwarzwald der Boden kaum tief austrocknet und Fröste in der Regel auf den Oberboden beschränkt sind.
b) Endogäische Arten haben zwar eine hohe Grabaktivität, sie beschränkt sich aber in der Regel auf den Oberboden und die Röhren sind nur wenig dauerhaft.
c) Bei typischen epigäischen Arten, wie den verschiedenen *Dendrobaena*-Arten und *L. castaneus*, wurden bisher keine Röhrensysteme beschrieben. Größere Exemplare von *L. rubellus* können aber zumindest an manchen Standorten ein einfaches Röhrensystem mit einer Mündung an der Bodenoberfläche und einigen dm Tiefe anlegen.

© Naturforschende Gesellschaft zu Freiburg im Breisgau c/o Institut für Geo- und Umweltnaturwissenschaften; download www.zobodat.at

6.3.1 Anzahl der Röhren

Eine Untersuchung der Röhren von tiefgrabenden Arten an 20 typischen Ackerstandorten in Baden-Württemberg in 4 Tiefenstufen (15 cm = im Ap, 40 cm = unterhalb Ap, sowie 70 und 100 cm) zeigte, dass in nassen Böden (Moor) und tonärmeren Böden (Sand) keine Röhren vorkamen (Ehrmann & Schwarz 2002; Abb 14). Die meisten Röhren wurden in Unterböden von Löss-Parabraunerden gefunden (schluffiger Lehm, 200 Röhren je m², Bild 28). Nur etwa die Hälfte wurde in etwas tonigeren Böden (Bodenart toniger Lehm) gefunden. Bei höherem Tonanteil (lehmiger Ton/Ton) war die Anzahl der Röhren nochmals deutlich geringer.

Auffallend war die sehr geringe Anzahl von Röhren im Oberboden. Diese betrug immer nur einen Bruchteil der Röhren im Unterboden (die Röhren wurden im Frühsommer in Winterweizen untersucht). Da ein *Lumbricus terrestris* nur eine tiefreichende Röhre hat, weist dies auf eine sehr geringe Produktion neuer Röhren hin. Im Oberboden werden die Röhren mindestens ein Mal im Jahr durch Bodenbearbeitung zerstört, im Unterboden sind sie dauerhafter. Dies gilt besonders für Löss-Parabraunerden, in tonreichen Böden werden Röhren wohl durch Quellen und Schrumpfen häufiger zerstört.

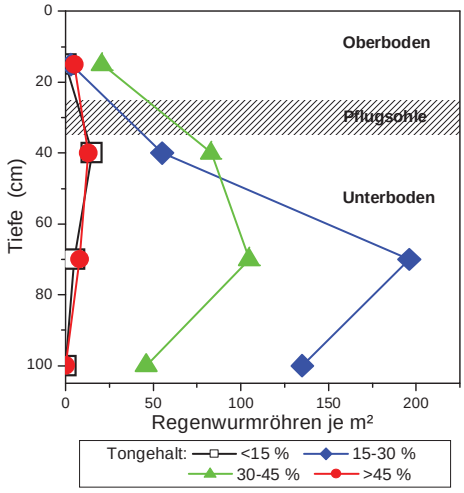


Abb. 14: Tiefenfunktion der Anzahl von Regenwurmröhren in Äckern Baden-Württembergs bei verschiedenen Bodenarten. Gezählt wurden nur Regenwurmröhren ≥ 7 mm Durchmesser. In sandigen und sehr schluffigen Böden fehlten Röhren tiefgrabender Regenwürmer (Ehrmann & Schwarz 2002). Fig. 14: Depth function of the number of earthworm burrows in arable fields of Baden-Württemberg in different soil types. Only earthworm burrows ≥7 mm diameter were counted. In sandy and very silty soils burrows of anecic species were not present (Ehrmann & Schwarz 2002).

© Naturforschende Gesellschaft zu Freiburg im Breisgau c/o Institut für Geo- und Umweltnaturwissenschaften; download www.zobodat.at

Bild 28: Röhren tiefgrabender Regenwürmer (links, Bildbreite 60 cm) **und Wurzelröhren** (rechts, Dünnschliff, Bildbreite 5 mm) **in einem Löss-Unterboden.**

Bild 29: Regenwurmröhren als Wege für Wasser und Wurzeln. Links: Bei einem Färbeversuch zeigte sich, dass der blaugrüne Farbstoff in einem verdichtete Ackerboden vor allem in der Regenwurmröhre transportiert wurde (Bildhöhe 90 cm). Rechts: Die Regenwurmröhren sind verlassen, in der linken und vor allem in der mittleren Röhre sind zahlreiche Wurzeln zu finden, die sich über diese Kanäle den Unterboden als Nährstoff- und Wasserreservoir erschließen können (Bildhöhe 15 cm).

6.3.2 Bedeutung der Regenwurmröhren

Vor allem die tiefreichenden Röhren der anezischen Regenwürmer haben größte Bedeutung für die Bodenstruktur. In den Unterböden von Äckern sind praktisch alle Poren über 5 mm Durchmesser Regenwurmröhren (Abb. 15). Diese sind darüber hinaus auch sehr stabil. Im Vergleich dazu bilden die derzeit in unseren Breiten angebauten Hauptkulturen von sich aus im Unterboden nur noch dünn entwickelte Wurzeln mit

© Naturforschende Gesellschaft zu Freiburg im Breisgau c/o Institut für Geo- und Umweltnaturwissenschaften; download www.zobodat.at

einem weniger stabilen Röhrensystem aus. Die Anzahl von Wurzelröhren (meist < 1 mm Durchmesser) ist allerdings sehr hoch. Sie sind aber weder so kontinuierlich, noch wegen des geringeren Durchmesser so leistungsfähig wie die Regenwurmröhren. Zusammen mit den großen Regenwurmröhren erschließen sie aber den Boden. Die Regenwurmröhren sind dabei die Autobahnen, die Wurzelröhren die Landstraßen (Bild 28). Im Grünland können in 40 cm Tiefe noch vereinzelt Wurzeln > 5 mm Durchmesser vorkommen (im Mittel von 16 Proben eine je m²), ihre Anzahl liegt aber deutlich unter denen der Regenwurmröhren. In 70 cm Tiefe wurden keine Wurzeln oder Wurzelröhren > 5 mm gefunden. In den Unterböden von Wäldern kommen in 40 cm

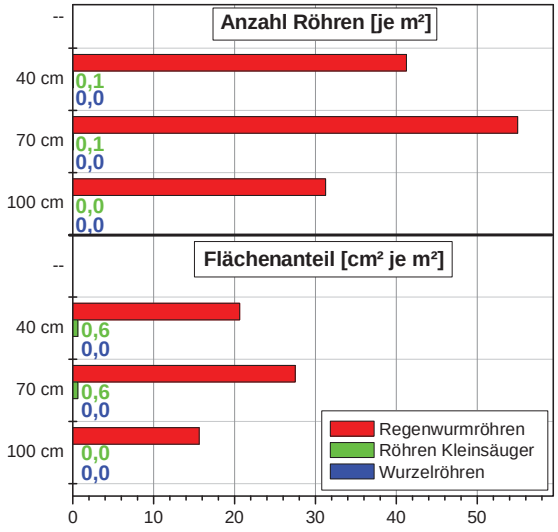


Abb. 15: Röhren > 5 mm Durchmesser in Äcker Baden-Württembergs. Mittelwerte über 20 verschiedene Standorte. An 5 der 20 Standorte kamen keine Röhren tiefgrabender Regenwürmer vor. **Fig. 15:** Earthworm burrows > 5 mm in diameter in arable fields of Baden-Württemberg. Averages over 20 different locations. In 5 of the 20 locations no burrows of anecic earthworms occurred.

Tiefe neben den Regenwurmröhren ähnlich viel große Wurzeln oder Wurzelröhren vor. Besonders in schweren und dichten Böden sowie in sehr nassen oder trockenen Jahren kann das Vorhandensein von Regenwurmgängen als Wuchskanäle für die Wurzeln ganz entscheidend für die Ertragsbildung sein.

6.3.3 Alter der Regenwurmröhren im Unterboden

Ein anezischer Regenwurm legt im Unterboden eine Röhre an, die Röhre verzweigt sich erst in der Nähe des Oberbodens. Trotzdem ist die Anzahl der Regenwurmröhren im Unterboden in aller Regel wesentlich höher als die der tiefgrabenden Regenwürmer. Besonders hohe Werte – oft mehrere hundert pro m² - findet man in den fruchtbaren Lössböden (Bild 28, Abb. 14, Ehrmann & Schwarz 2002), obwohl aktuell meist nur wenige große Regenwürmer vorkommen und jedes Tier auch nur eine ein-

© Naturforschende Gesellschaft zu Freiburg im Breisgau c/o Institut für Geo- und Umweltnaturwissenschaften; download www.zobodat.at

zige tiefreichende Röhre anlegt. Dabei kann das Alter dieser Röhren in den Unterböden beträchtlich sein (Bild 30), selbst in begrabenen (sog. fossilen) Böden aus Zwischeneiszeiten findet man noch offene Regenwurmröhren. Die Röhren sind also nicht nur ein Produkt der aktuellen Regenwurmpopulation, sondern ein Kapital, das sich in der Vergangenheit gebildet hat. Bei einem Vergleich verschiedener Bodenbearbeitungsverfahren zeigte sich, dass bei reduzierter Bodenbearbeitung die Anzahl der Regenwurmröhren im Unterboden deutlich größer war (Abb. 16). Es zeigte sich aber auch, dass die Anzahl der Regenwurmröhren auch nach 20 Jahren Versuchszeit noch nicht im Gleichgewicht war (Abb. 17). So wies z. B. die für Regenwürmer ungünstige Pflugvariante trotz geringer Regenwurmpopulation immer noch relativ viele große Röhren im Unterboden auf (28 je Regenwurm). Bei der Direktsaat lag dieser Quotient bei 7.

Die Röhren im Unterboden sind z. B. gefährdet durch Befahren mit schweren Maschinen. Durch eine Tieflockerung werden die Röhren in der Regel zerstört bzw. zumindest in ihrer Kontinuität unterbrochen, so dass sie ihre Drainagefunktion weitgehend verlieren.

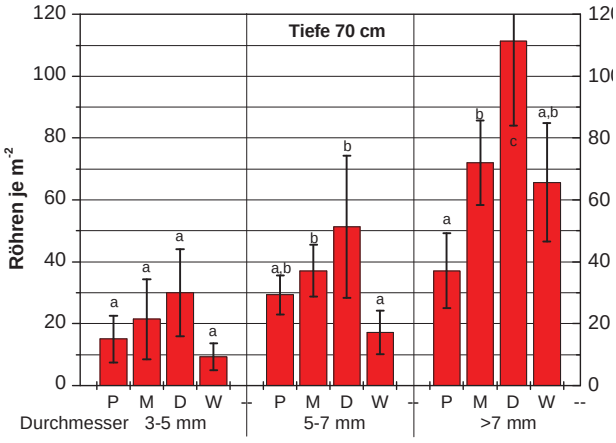


Abb. 16: Anzahl von Regenwurmröhren bei Pflug (P), Mulchsaat (M), Direktsaat (D) und Grünland (W) in 70 cm Tiefe. Die Unterschiede zwischen den Varianten sind mit Kleinbuchstaben dargestellt (unterschiedliche Kleinbuchstaben = Unterschied stat. gesichert, U-Test, α=0,05; Ehrmann 2015). **Fig. 16:** Number of earthworm tubes at Plough (P), mulch-till (M), direct drilling (D) and grassland (W) in 70 cm depth. The differences between the variants are shown with lowercase letters (different lowercase = difference statistically secured, U-test, α = 0.05; Ehrmann 2015).

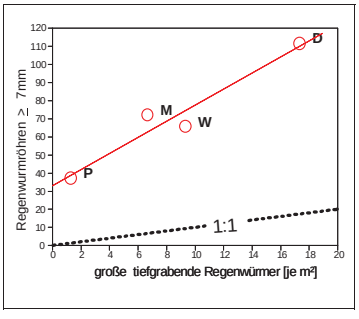


Abb. 17: Korrelation zwischen der Anzahl großer Regenwürmer und der Anzahl großer Regenwurmröhren (Ø ≥7 mm) in 70 cm Tiefe nach 20 Jahren unterschiedlicher Bewirtschaftung (Standort Dossenheim, P = Pflug, M = Mulchsaat, D = Direktsaat, W = Wiese; EHRMANN 2015) **Fig. 17:** Correlation between the number of large earthworms and the number of large earthworm burrows (Ø ≥7 mm) in 70 cm depth after 20 years of different management (location Dossenheim, P = plough, M = mulch-till, D = direct drilling, W = meadow; Ehrmann 2015)

© Naturforschende Gesellschaft zu Freiburg im Breisgau c/o Institut für Geo- und Umweltnaturwissenschaften; download www.zobodat.at

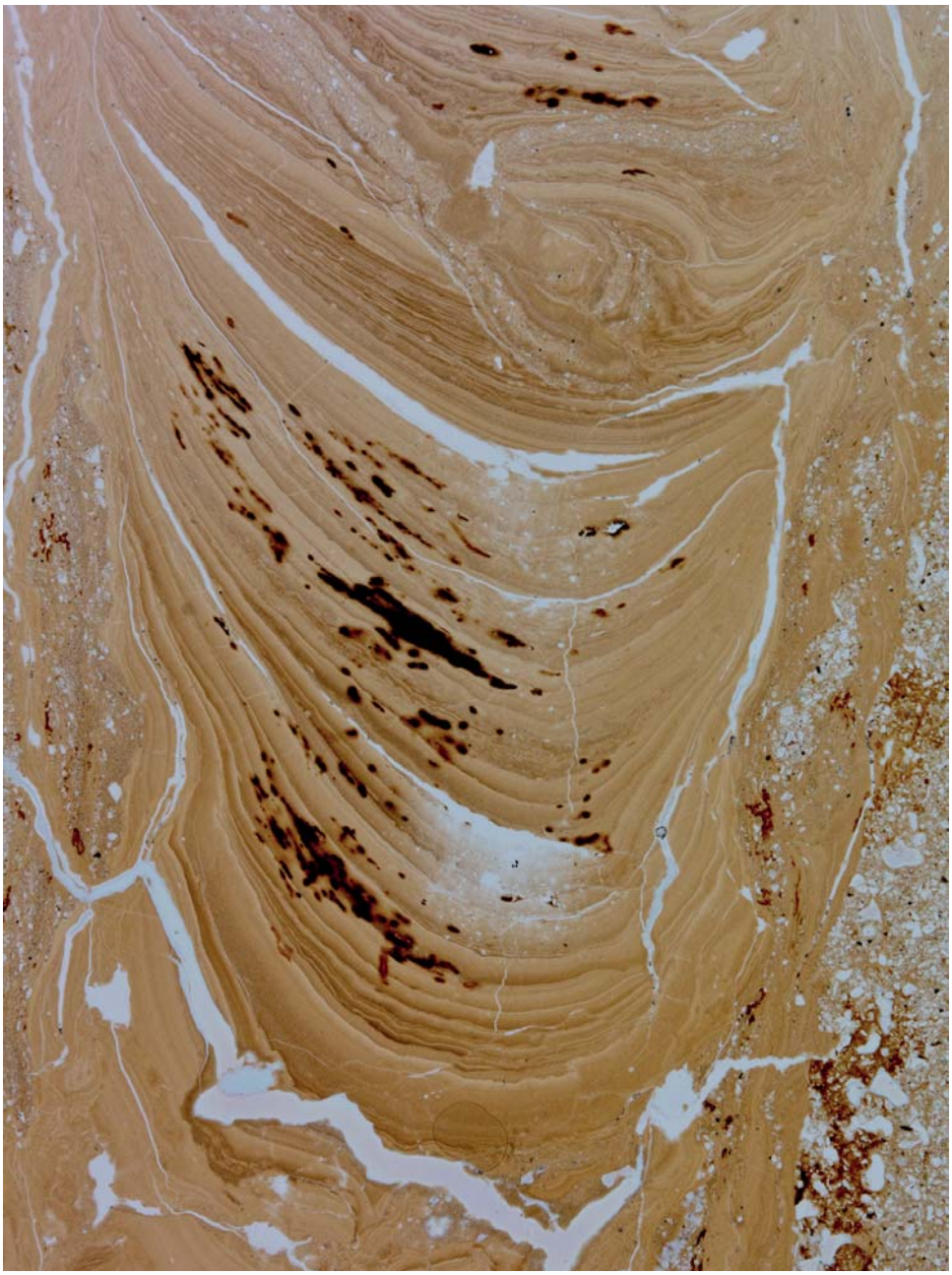


Bild 30: Tonverlagerung in einer Regenwurmröhre (natürliche Bildbreite 4mm). Die Regenwurmröhre wurde allmählich mit Ton verfüllt. Über 100 Regenereignisse mit Tonverlagerung waren notwendig bis zur vollständigen Verfüllung der Röhre.

© Naturforschende Gesellschaft zu Freiburg im Breisgau c/o Institut für Geo- und Umweltnaturwissenschaften; download www.zobodat.at

6.4 Wie groß ist der positive Effekt der Regenwürmer auf den Boden?

Die Folgen eines Ausfalls der Regenwürmer lassen sich nur schwer ermitteln. Relativ einfach ist zwar der Ausschluss von Regenwürmern in Topfversuchen, aber diese Versuche sind „gestört" hinsichtlich Bodenstruktur, Temperaturbedingungen, Tiergemeinschaft usw. und sie liefern daher nur bedingt übertragbare Ergebnisse. In Topfversuchen mit und ohne Regenwürmern werden z. T. dramatische Mehrerträge bei der Anwesenheit von Regenwürmern festgestellt. Bei der hinsichtlich Bodenstruktur besonders empfindlichen Gerste stellte Atlavinyte (1990) eine deutlich schnellere Keimung und einen deutlich höheren Ertrag fest (169-305%, Kontrolle = 100%). Bei kleinen Birken ermittelten Haima et al. (1992) ein um ca. 33 % besseres Stammwachstum. Mehrere Autoren ermittelten in Versuchen mit Schadpilzen ein deutlich besseres Wachstum von Getreide (Clapperton et al. 2001) bzw. Grünlandpflanzen (Stephens et al. 1997) bei gleichzeitigem Vorkommen von Regenwürmern.

Bei den hinsichtlich der Übertragbarkeit günstiger zu beurteilenden Feldversuchen ist es immens schwierig, Regenwürmer effektiv auszuschließen, ohne den Boden massiv zu verändern. Hinzu kommt, dass bei Feldversuchen bereits eine von Regenwürmern geschaffene Struktur existiert, die auch - mindestens im Unterboden – über Jahre bis Jahrhunderte noch positive Wirkungen hat. Baker et al. (2003) untersuchten in Australien in +/- ungestörten Freilandkäfigen den Einfluss zweier Regenwurmarten auf das Wachstum und den Ertrag von Hafer und Lupinen. Bei Anwesenheit von *Aporrectodea trapezoides* war der Ertrag von Hafer deutlich höher, *Aporrectodea rosea* führte hingegen zu keiner Ertragsverbesserung. Bei der stickstofffixierenden Lupine hatte die Anwesenheit von Regenwürmern keine Ertragsverbesserung zur Folge. Clements et al. (1991) untersuchten in einem Langzeitexperiment (20 Jahre) in England im Grünland die Auswirkungen des Ausschlusses der Regenwürmer durch das Pestizid Phorat, das neben vielen Pflanzenschädlingen auch Regenwürmer reduzierte. Die Bodenparameter (Dichte, Nährstoffe) verschlechterten sich deutlich und es bildete sich eine Streumatte, aber der Ertrag des Grünlands war bei Anwendung des Pestizides ohne Regenwürmer in den ersten 11 Jahren höher, danach ähnlich wie in der Kontrolle. Vermutlich beruht der höhere Ertrag ohne Regenwürmer in den ersten elf Jahren auf einem Wegfall der Pflanzenschädlinge. Insgesamt war auch das Düngungsniveau extrem hoch (188-752 kg N/a), so dass auch die Nährstoffmineralisierung durch Regenwürmer nicht relevant wurde.

In Quebec untersuchten Eriksen-Hamel & Whalen (2007) den Einfluss der Regenwürmer auf den Ertrag von Mais und Sojabohnen. Dazu wurden Freilandkäfige angelegt und die vorhandene Regenwurmfauna durch Pestizideinsatz reduziert. Anschließend wurden Regenwürmer eingesetzt. In einem für Regenwürmer günstigen Jahr hatten sie einen deutlich positiven Einfluss auf den Ertrag, im ungünstigen Jahr (hohe Mortalität der Regenwürmer) keinen nachweisbaren. In neu angelegten holländischen Poldern, die nach der Anlage noch regenwurmfrei waren, stellten Hoogerkamp et al.

© Naturforschende Gesellschaft zu Freiburg im Breisgau c/o Institut für Geo- und Umweltnaturwissenschaften; download www.zobodat.at

(1983) in Weiden, auf denen Regenwürmer angesiedelt wurden, deutlich bessere Bodeneigenschaften und einen um ca. 10% höheren Ertrag fest. In regenwurmfreien neuseeländischen Weiden konnte durch das Einbringen von Regenwürmern ein Ertragsanstieg um 20 % erreicht werden (Stockdill 1982)

Aus eigener Anschauung sind benachbarte Flächen bekannt, die vor einer Flurbereinigung regenwurmschonend bzw. „normal“ bewirtschaftet wurden. Drei Jahre nach der Zusammenlegung der Flächen im Zuge der Flurbereinigung starb der Winterweizen auf der „normal“ bewirtschafteten Fläche am Ende eines nassen Winters ab (dies machte eine Neusaat von Sommergetreide erforderlich), auf der regenwurmschonend bewirtschafteten Fläche überlebte er. Die Ertragseinbuße liegt in solchen Fällen bei mindestens 20 %, hinzu kommt der Aufwand für die Neusaat.

In einer umfangreichen Literaturstudie in der Schweiz kamen Bieri & Cuendet (1989) zu dem Schluss, dass „der Einfluss der Regenwürmer auf die landwirtschaftlich genutzten Flächen grundsätzlich als äußerst positiv beurteilt werden muss“.

6.5 Leistungen der verschiedenen ökologischen Gruppen im Vergleich

Die Leistungen der verschiedenen ökologischen Gruppen sind in Tab. 3 zusammengestellt. Die Einmischung von organischer Substanz in den Boden erfolgt vor allem durch anezische und große epigäische Arten. Für die Feinvermischung von organischer und mineralischer Substanz sind endogäische Arten besonders wichtig. Diese legen auch zahlreiche Röhren im Oberboden an. Tiefreichende Röhren werden hingegen nur von anezischen Arten angelegt. Alle wesentlichen Funktionen werden nur erfüllt, wenn an einem Standort verschiedene Lebensformen vorkommen. Dabei ist eine Kombination von anezischen und endogäischen Arten hinreichend.

6.6 Sind die Leistungen der Regenwürmer durch maschinelle Bodenbearbeitung ersetzbar?

Durch Maschinen kann man Ernterückstände wesentlich schneller einmischen und einen verdichteten Oberboden auch wesentlich schneller lockern als dies selbst eine umfangreiche Regenwurmpopulation tun könnte (Tab. 3). Aber eine Feinvermischung von organischer Substanz mit dem Boden auf der µm-Skala können Maschinen nicht durchführen. Auch kann man in hoch stehenden Beständen Krusten infolge Verschlämmung nicht oder kaum mechanisch ohne Schäden für die Kulturpflanzen aufbrechen (Bild 31) und auch für die Anlage tiefreichender stabiler Röhren gibt es kein Gerät. Daher ist es auch im Ackerbau günstig, eine möglichst große Anzahl an Regenwürmern im Boden zu haben. Eine rein biologische Bodenbearbeitung ohne Maschinen funktioniert prinzipiell; dies belegen praktisch die meisten Wald- und Grünlandböden und zahlreiche Direktsaatflächen.

© Naturforschende Gesellschaft zu Freiburg im Breisgau c/o Institut für Geo- und Umweltnaturwissenschaften; download www.zobodat.at

Tab. 3: Vergleich der Leistungen von Regenwürmern mit der von Maschinen/Geräten zur Bodenbearbeitung (Ehrmann 1996, verändert). **Tab. 3:** Comparison of the performance of earthworms with equipment for tillage (Ehrmann 1996, modified)

	Regenwürmer			Maschinen/Geräte
	Streu-bewohner	Flach-gräber	Tief-gräber	
- Einmischen von organischer Substanz in den Boden (z.B. Erntereste, Mist)	+	+	+++	+++
- Feinvermischen von org. Substanz mit dem Boden → Basis für Bildung von Ton-Humus-Komplexen)	+	+++	++	nicht möglich
Lockerung				
- des Oberbodens	+	+++	++	+++
- des Unterbodens	-	-	+	problematisch
Aufbrechen von Krusten als Folge von Verschlämmung im stehenden Bestand	+	++	++	selten möglich
Anlage stabiler tiefreichender Röhren	-	-	+++	nicht möglich
Geschwindigkeit	allmählich			sehr schnell

- = nicht, + = wenig, ++ = mittel, +++ = viel

Insgesamt lässt sich festhalten, dass die Tätigkeit der Regenwürmer eine sehr umfassende und effektive Form der Bodenbearbeitung darstellt. Es gibt kein energie- und umweltschonenderes Verfahren. Durch Maschineneinsatz kann nur ein Teil des Wirkungsspektrums der Regenwürmer abgedeckt werden (Tab. 3). Die von ihnen angelegten Strukturen, die oft eine Haltbarkeit von Jahren bis Jahrhunderten haben, bauen sich jedoch erst zeitversetzt auf, nachdem sich eine entsprechende Regenwurmpopulation etabliert hat.

- **Was können Regenwürmer z.B. nicht leisten?**

Regenwürmer sind sicher die Bodentiere mit der größten Wirkung auf den Boden in Mitteleuropa. Aber auch bei einem hohen Regenwurmbesatz sind bleibende Bodenschäden möglich. So können z. B. Regenwürmer alleine Bodenerosion nicht wirksam verhindern, dies ist nur durch ein ganzes Bündel von Erosionsschutzmaßnahmen möglich. Auch können Regenwürmer die durch den zunehmenden Einsatz von überschweren Maschinen in Land -und Forstwirtschaft verursachten gravierenden Unterbodenverdichtungen nicht wieder auflösen. Die Regenwürmer erhöhen zwar allmählich die Anzahl der für Transportprozesse wichtigen vertikalen Poren, dazwischen bleibt der Boden aber verdichtet.

© Naturforschende Gesellschaft zu Freiburg im Breisgau c/o Institut für Geo- und Umweltnaturwissenschaften; download www.zobodat.at

Bild 31: Ein tiefgrabender Regenwurm hat an der Mündung seiner Wohnröhre die durch Verschlämmung entstandene Kruste aufgebrochen.

Bild 32: Zwei Laufkäfer fressen einen verletzten Regenwurm.

© Naturforschende Gesellschaft zu Freiburg im Breisgau c/o Institut für Geo- und Umweltnaturwissenschaften; download www.zobodat.at

7. Regenwürmer als Nahrungsquelle für andere Tiere

Regenwürmer weisen die größte Biomasse aller tierischen Organismen in Baden-Württemberg auf (siehe Tab.2). Die stoffliche Zusammensetzung eines Regenwurms ist günstig als Nahrungsquelle: Der Regenwurm ist sehr eiweißreich und besitzt kein Skelett. Störend dürfte höchstens der mineralische Darminhalt sein (Abb. 18).

Daher wundert es nicht, dass der Regenwurm bei einer Reihe von Tieren auf dem "Speisezettel" steht. Die Liste in Abb. 18 ist sicher sehr unvollständig. Allerdings steht die "Ressource" Regenwurm nicht ganzjährig zur Verfügung. Bei Frost und Trockenheit haben die Regenwürmer Ruhephasen, die sie - meist unerreichbar für oberflächenaktive Tiere - im Boden verbringen. Daher gibt es nicht besonders viele Tiere, die ausschließlich auf Regenwürmer spezialisiert sind, aber sehr viele Tiere, bei denen Regenwürmer eine wesentliche Rolle als Nahrungsquelle haben (Abb. 18, Bild 32, Bild 33).

Durch die Fraßfeinde sind Regenwurmpopulationen in der Regel nicht gefährdet (Judas 1989) - mit Ausnahme des Plattwurmes (siehe unten). Ein Ausfall der Regenwürmer würde aber umgekehrt einigen Spezialisten Probleme bereiten. Viele andere

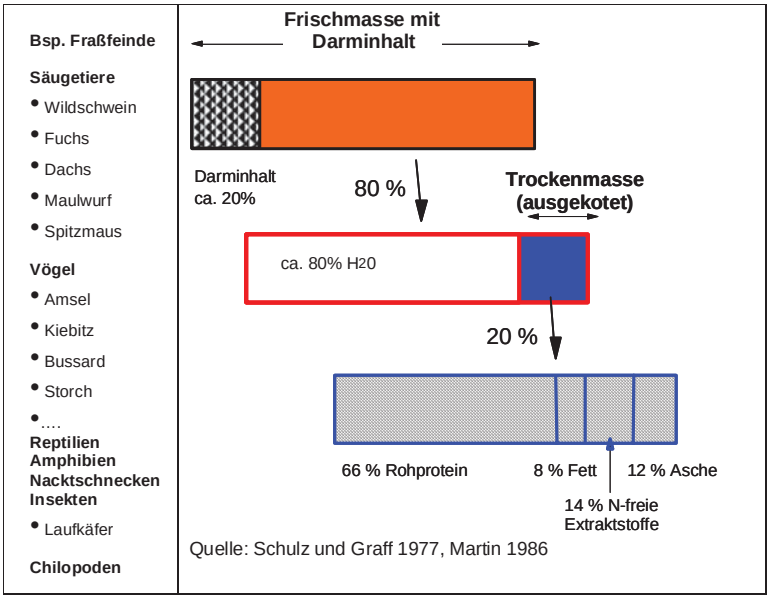


Abb. 18: stoffliche Zusammensetzung eines Regenwurms (Schulz & Graff 1977, Martin 1986) und Beispiele für Fraßfeinde (eigene Beobachtungen). **Fig. 18:** physical composition of an earthworm (Schulz & Graff 1977, Martin 1986) and examples of herbivores (own observations).

© Naturforschende Gesellschaft zu Freiburg im Breisgau c/o Institut für Geo- und Umweltnaturwissenschaften; download www.zobodat.at

Bild 33: Kiebitz fängt Regenwurm. Wenn der Boden zum Ende des Winters aufgetaut und etwas erwärmt, aber noch nicht abgetrocknet ist, rasten in Nordostwürttemberg regelmäßig Kiebitze auf dem Durchzug. Zu dieser Zeit sind viele Regenwürmer nahe der Bodenoberfläche aktiv. Die Kiebitze sind sehr geschickte Regenwurmfänger. Ein Tier fängt in einer Stunde in der Regel mindestens 5 größere Regenwürmer (meist *Lumbricus terrestris,* eigene Beobachtungen).

Tiere hätten keine wichtige zusätzliche Nahrungsquelle mehr. So sind Regenwürmer die wichtigste Nahrungsquelle von Kiebitzen im Frühjahr auf dem Durchzug (Bild 33) und junge unerfahrene Bussarde fangen sehr oft Regenwürmer (eigene langjährige Beobachtungen). Ein Ausfall dieser großen Nahrungsressource hätte daher erhebliche Auswirkungen im Tierreich.

Der aus Neuseeland auf die Britischen Inseln und Irland eingeschleppte Plattwurm *Arthurdendyus triangulatus* hat sich zu einer echten Bedrohung der dortigen Regenwurmfauna entwickelt. Er kann Regenwurmpopulationen stark dezimieren und lokal sogar ausrotten (Mather & Christensen 1993, Blackshaw 1995). Aufgrund seiner klimatischen Ansprüche könnte er auch im atlantisch getönten Nordwestdeutschland leben.

© Naturforschende Gesellschaft zu Freiburg im Breisgau c/o Institut für Geo- und Umweltnaturwissenschaften; download www.zobodat.at

Angeführte Schriften

AG Boden (2005): Bodenkundliche Kartieranleitung, Ad-hoc-AG-Boden, 5. Auflage, Hannover/Stuttgart, 438 S.

Albrecht, M. (1998): Vergleichende Untersuchungen der Regenwurmpopulation differenziert bewirtschafteten und genutzten Grünlandes verschiedenen Alters. Diplomarbeit Universität Hohenheim, 67 S.

Atlavinyte, O. (1990): The effect of earthworms on agrocoenoses. Mokslas Publishers, Vilnius, 179 S.

Baker, G. H., Amato, M. & Ladd, J. (2003): Influences of *Aporrectodea trapezoides* and *A. rosea* (Lumbricidae) on the uptake of nitrogen and yield of oats (*Avena fatua*) and lupins (*Lupinus angustifolius*). Pedobiologia 47: 857-862.

Baker, S. W. & Binns, D. J. (1998): Earthworm casting on golf courses: a questionnaire survey. Journal of Turfgrass Science 74: 11-19.

Baltzer, R. (1956): Die Regenwürmer Westfalens - eine tiergeographische, ökologische und sinnesphysiologische Untersuchung. Zoolog. Jb. 84: 355-414.

Barnes, B. T. & Ellis, F. B. (1979): Effects of different methods of cultivation and direct drilling, and disposal of straw residues, on populations of earthworms. Journal of Soil Science 30: 669-679.

Barois, I., Villemin, G., Lavelle, P. & Toutain, F. (1993): Transformation of the soil structure through *Pontoscolex corethrurus* (Oligochaeta) intestinal tract. In: Brussard, L. und M.J. Kooistra (eds.): Soil structure/soil biota interrelationships. Geoderma 56: 57-66.

Bauchhenss, J. (1981): Wirkung belüfteter und unbelüfteter Gülle auf die Regenwurmfauna. Bericht über die 7. Arbeitstagung „Fragen der Güllerei“. Bundesversuchsanstalt für alpenländische Landwirtschaft Gumpenstein: 739-748.

Bauchhenss, J. (2007): Regenwürmer als Bioindikatoren Bodenzoologische Untersuchungen auf BDF. Bodenbiologische Bewertung von Boden-Dauerbeobachtungsflächen (BDF) anhand von Lumbriciden, UBA-Texte 34/07: 21-32.

Beck, L., Römbke, J., Paulus, R., Ruf, A., Scheurig, M., Spelda, J. & Woas, S. (2001): Bodenfauna und Umwelt – Bodenökologische Inventur und Beurteilung von ausgewählten Standorten in Baden-Württemberg. PAOE-Report (Baden-Württemberg), 131 ff.

Becker, J. (1999): Auswirkungen von kupferbelasteten Weinbergsböden auf das Artenspektrum und die Funktion von Weinbergsböden. Diplomarbeit Universität Hohenheim, Institut für Bodenkunde und Standortslehre.

Berman, D. I., Meshcheryakova, E. N., Alfimov, A. V. & Leirikh, A. N. (2001): Spread of the Earthworm Dendrobaena octaedra(Lumbricidae: Oligochaeta) from Europe to Northern Asia Is Restricted by Its Insufficient Frost Resistance. Doklady Biological Sciences 377: 145-148.

Bernier, N. & Ponge, J. F. (1994): Humus Form Dynamics during the Sylvogenetic Cycle in a Mountain Spruce Forest. Soil Biol. Biochem., 2: 183-220.

© Naturforschende Gesellschaft zu Freiburg im Breisgau c/o Institut für Geo- und Umweltnaturwissenschaften; download www.zobodat.at

Bieri, M., & Cuendet, G. (1989): Die Regenwürmer, eine wichtige Komponente von Ökosystemen. Schweiz. Landw. Fo. 28: 81-96.

Blackshaw, R. P. (1995): Changes in popualtions of the predatory flatworm *Artioposthia triangulata* and its earthworm prey in grassland. Acta Zoologica Fennica 19: 107-110.

Bouché, M. B. (1972): Lombriciens de France - Écologie et Systématique. Institut Nationale de la Recherche Agronomique, Paris, 672 S.

Bouché, M. B. (1977): Stratégies lombriciennes. In: Lohm, U. & Persson, T. (eds.): Soil Organisms as Components of Ecosystems. Proc. 6th Int. Coll. Soil Zool., Ecol. Bull. (Stockholm) 25: 122-132.

Clapperton, M. J., Lee, N. O., Binet, F. & Conner, R. L. (2001) : Earthworms indirectly reduce the effects of take-all (*Gaeumannomyces graminis* var. *tritici*) on soft white spring wheat (*Triticum aestivum* cv. Fielder). Soil Biology and Biochemistry 33: 1531-1538.

Clements, R. O., Murray, P. J. & Sturdy, R. G. (1991): The impact of 20 years' absence of earthworms and three levels of N fertilizer on a grassland soil environment. Agriculture, Ecosystems and Environment 36: 75-85.

Curry, J. P. (1976): Some effects of animal manures on earthworms in grassland. Pedobiologia 16: 425-438.

Dexter, A. R. (1978): Tunnelling in soil by earthworms. Soil Biol. & Biochem. 10: 447-449.

Dunger, W. (1983): Tiere im Boden. Die Neue Brehm Bücherei 327, Ziemsen Verlag, Wittenberg.

Edwards, C. A. (1980): Interactions between agricultural practice and earthworms. - In: Dindal, D.L. (ed.): Soil biology as related to land use practice. - Proc. VII. Int. Coll. Soil Zool., Syracuse: 3-12.

Edwards, C. A. & Lofty, J. R. (1977): Biology of earthworms. Chapman & Hall, London; John Wiley & Sons, New York, 333 S.

Edwards, C. A. & Bohlen, P. J. (1996): Biology and Ecology of Earthworms. 3. Aufl., Chapman & Hall, London, 379 S.

Edwards, W. M., Shipitalo, M. J., Traina, S. J., Edwards, C. A. & Owens, L. B. (1992): Role of *Lumbricus terrestris* (L.) burrows on the quality of infiltrating water. In: Kretzschmar, A. (ed.): 4th International Symposium on Earthworm Ecology - Soil Biol. & Biochem. 24: 1555-1462.

Ehlers, W. (1975): Observations on earthworm channels and infiltration on tilled and untilled loess soils. Soil Sci. 119: 242-249.

Ehrmann, O. (1994): Regenwürmer in Acker und Feldrain. - Verh. Ges. Ökol. 23: 89-93.

Ehrmann, O. (1996): Regenwürmer in einigen südwestdeutschen Agrarlandschaften: Vorkommen, Entwicklung bei Nutzungsänderungen und Auswirkungen auf das Bodengefüge. Hohenheimer Bodenkundliche Hefte 35, Institut für Bodenkunde und Standortslehre, Universität Hohenheim, Stuttgart, 135 S.

Ehrmann, O (2003): Vorkommen von anezischen Regenwürmern in zwei

© Naturforschende Gesellschaft zu Freiburg im Breisgau c/o Institut für Geo- und Umweltnaturwissenschaften; download www.zobodat.at

unterschiedlich strukturierten Kleinlandschaften Südwestdeutschlands. Mitteilungen Dt. Bodenkundl. Gesellsch. 102: 271-272.

Ehrmann, O. (2008): Auswirkungen des Klimawandels auf die Regenwürmer Baden-Württembergs. Literaturstudie im Auftrag der LUBW Baden-Württemberg, 64 S.

Ehrmann, O. (2015): Untersuchung von Regenwürmern und Regenwurmröhren am Standort Dossenheim des Systemvergleichs Bodenbearbeitung. Bericht im Auftrag des LTZ Augustenberg, 28 S.

Ehrmann, O. & Babel, U. (1991): Quantitative Regenwurmerfassung - ein Methodenvergleich. Mitteilungen Dt. Bodenkundl. Gesellsch. 66, I: 475-478.

Ehrmann, O., Friedel, J. K. & Lung, G. (1996): Ursachen für das kleinräumige Auftreten von Wachstumsdepressionen in einem Haferfeld. Mitteilungen der Dt. Bodenkundl. Gesellschaft 81: 377-380.

Ehrmann, O. & Vollmer, T. (2001): Einfluss von Regenwürmern auf die Oberbodenstruktur in Wäldern Südwestdeutschlands. Mitteilungen Dt. Bodenkundl. Gesellsch. 96: 321-322.

Ehrmann, O. & Schwarz, A. (2002): Regenwurmröhren in Äckern Südwestdeutschlands - Vorkommen und Bedeutung für Stofftransporte. Mitteilungen Dt. Bodenkundl. Gesellsch. 99: 175-176.

Ehrmann, O., Sommer, M. & Vollmer, T. (2002): Regenwürmer in Wäldern Baden-Württembergs: In: Sommer, M., Ehrmann, O., Friedel, J.K., Martin, K., Vollmer, T. & Turian, G.: Böden als Lebensraum für Organismen – Regenwürmer, Gehäuselandschnecken und Bodenmikroorganismen in Wäldern Baden-Württembergs. Hohenheimer Bodenkundliche Hefte 63, Institut für Bodenkunde und Standortslehre, Universität Hohenheim, Stuttgart. 163 S.

Eriksen-Hamel, N. S. & Whalen, J. K. (2007): Impacts of earthworms on soil nutrients and plant growth in soybean and maize agroecosystems. Agriculture, Ecosystems & Environment 120: 442-448.

Evans, A. C. & McL. Guild, W. J. (1948): Studies on the relationships between earthworms and soil fertility. IV. On the life cycles of some British Lumbricidae. Ann. Appl. Biol. 35: 471-484.

Gaupp-Berghausen, M., Hofer, M., Rewald, B. & Zaller, J. G. (2015): Glyphosate-based herbicides reduce the activity and reproduction of earthworms and lead to increased soil nutrient concentrations. Scientific Reports 5:12886, 9 S., http://www.nature.com/articles/srep12886.

GEFU (1993): Integriertes Rheinprogramm: Faunistische-biologische Untersuchungen auf Dauerbeobachtungsflächen am Oberrhein. Bericht im Auftrag der LfU Baden-Württemberg. 210 S.

Glasstetter, M. (1991): Die Bodenfauna und ihre Beziehungen zum Nährstoffhaushalt in Geosystemen den Tafel- und Faltenjura (Nordwestschweiz). Baseler Beiträge zur Physiogeographica. Physiogeographica 15, Basel, 224 S.

Graff, O. (1953): Die Regenwürmer Deutschlands. - Schr. R. d. Forsch.anst. Braunschweig, 81 S.

© Naturforschende Gesellschaft zu Freiburg im Breisgau c/o Institut für Geo- und Umweltnaturwissenschaften; download www.zobodat.at

Graff, O. (1970): Der Einfluß verschiedener Mulchmaterialien auf den Nährelementgehalt von Regenwurmröhren im Unterboden. Pedobiologia 10: 305-319.

Graff, O. (1971): Stickstoff, Phosphor und Kalium in der Regenwurmlosung auf der Wiesenversuchsfläche des Sollingprojektes. In D'Aguilar, J. (ed.): IV Colloquium Pedobiologiae, INRA Publ. 71-7: 503-511.

Graff, O. (1983): Unsere Regenwürmer: Lexikon für Freunde d. Bodenbiologie, Schaper Hannover, 1983, 111 S.

Haima, J., Huhta, V. & Boucelham, M. (1992): Growth increase of birch seedlings under the influence of earthworms – a laboratory study. In: Kretzschmar, A. (ed.): 4th International Symposium on Earthworm Ecology - Soil Biol. & Biochem. 24: 1525-1528.

Holmstrup, M. & Zachariassen, K. E. (1996): Physiology of cold hardiness in earthworms. Comparative Biochemistry and Physiology 115A: 91-101.

Hoogerkamp, M., Roogar, H. & Eijsackers, H. J. (1983): Effect of earthworms on grassland on recently reclaimed polder soils in the Netherlands. In: Satchell, J. E. (ed.): Earthworm Ecology. Chapman and Hall London: 85-105.

Joschko, M., Diestel, H. & Larink, O. (1989): Assessment of earthworm burrowing efficiency in compacted soil with a combination of morphological and soil physical measurements. Biol. Fertil. Soils 8: 191-196.

Judas, M. (1989): Predator-pressure on earthworms: field experiments in a beechwood. Pedobiologia 33, 339-354.

Krüger, W. (1952): Einfluß der Bodenbearbeitung auf die Tierwelt der Felder. Z. Acker u. Pflanzenbau 95: 261-302.

Lamparski, F. (1985): Der Regenwurm *Lumbricus badensis* – seine Wohnröhre, seine Verbreitung und sein Einfluss auf die Böden im Südschwarzwald. Dissertation an der Geowissenschafltichen Fakultät der Albert-Ludwig-Universität Freiburg, 327S.

Lavelle, P. M. A. & Kretzschmar, A. (1992). Small-scale and large-scale effects of endogeic earthworms on soil organic matter dynamics in soils of the humid tropics. 4th International Symposium on Earthworm Ecology - Soil Biol. & Biochem 24: 1491-1498.

Lee, K. E. (1985): Earthworms: Their Ecology and Relationsships with Soil and Land Use. Academic Press, Sydney, 411 S.

Lehmitz, R., Römbke, R., Jänsch, S., Krück, S., Beylich, A. & Graefe, U. (2014): Checklist of earthworms (Oligochaeta: Lumbricidae) from Germany, Zootaxa 3866 (2): 221–245

Lofs-Holmin, A. (1986): Occurence of eleven Earthworm Species (Lumbricidae) in Permanent Pastures in Relation to Soil-pH. Swedish J. aric. Res. 16: 161-165.

Ma, W. C. Brussaard, L. & de Ridder, J. A. (1990): Long-term Effects of Nitrogenous Fertilizers on Grassland Earthworms (Oligochaeta: Lumbricidae): Their Relation to Soil Acidification. Agriculture, Ecosystems and Environment 30: 71-80.

Marinissen, J. C. Y. & Dexter, A. R. (1990): Mechanisms of stabilization of earthworm casts and artificial casts. Biol. Fertil. Soils 9: 163-167.

© Naturforschende Gesellschaft zu Freiburg im Breisgau c/o Institut für Geo- und Umweltnaturwissenschaften; download www.zobodat.at

Marinissen, J. C. Y. & van den Bosch, F. (1992): Colinization of new habitats by earthworms. Oecologia 91: 371-376.

Marinissen, J. C. Y. & Bok, J. (1988): Earthworm-amended soil structure: Its influence on Collembola populations in grassland. Pedobiologia 32: 243-252.

Martin, N. A. (1986): Earthworm biomass: Influence of gut content and formaldehyd preservation on live-to-dry weight ratios of three common species of pasture Lumbricidae. Soil Biol. & Biochem. 18: 245-250.

Martin, A. (1991): Short-term and long-term effect of the endogeic earthworm *Millsonia anomala* (Omodeo) (Megascolecidae Oligochaeta) of tropical savannas on soil organic matter. Biol. Fertil. Soils 11: 234-238.

Mather, J. G. & Christensen, O. (1993): the exotic land planarian *Artioposthia triangulata* in the Faroe Islands: colonisation and habitats. Frodskaparit 40: 49-60.

Ministerium für Umwelt und Verkehr Baden-Württemberg (1995): Bewertung von Böden nach ihrer Leistungsfähigkeit. Leitfaden für Planungen und Gestattungsverfahren. Heft 31 der Reihe Luft, Boden, Abfall, 53 S.

Muys, B. & Granval, P. (1997): Earthworms as Bioindicators of Forest Site Quality. Soil Biol. Biochem. 29, (3/4): 323-328.

Nielsen, G. A. & Hole, F. D. (1964): Earthworms and the Development of Coprogenous A1 Horizons in Forest Soils of Wisconsin. Soil Science Society Proceedings Vol. 28, Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin: 426-430.

Niklas, J. (1980): Zur Wirkung von Pestiziden, insbesondere von Benzimidazolen auf Regenwürmer und andere Bodentiere in Obstanlagen. Dissertation, Institut für Phytomedizin, Universität Hohenheim, 105 S.

Nordström, S. & Rundgren, S. (1974): Environmental factors and lumbricid associations in southern Sweden. Pedobiologia 14: 1-27.

Pizl, V. (1992): Effect of soil compaction on earthworms (Lumbricidae) in apple orchard soil. In: Kretzschmar, A. (ed.): 4th International Symposium on Earthworm Ecology - Soil Biol. & Biochem. 24: 1573-1575.

Römbke, J., Beck, L. Förster, B., Fründ, H.- C., Horak, F., Ruf, A., Rosciczewski, C., Scheurig, M. & Woas, S. (1997): Boden als Lebensraum für Bodenorganismen – bodenbiologische Standortsklassifikation – Literaturstudie. Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg, Karlsruhe, 437 S.

Satchell, J. E. (1967): Lumbricidae. In: Burges, A. und F. Raw (eds.): Soil biology. Academic Press London: 259-322.

Schaefer, M. (1989): Die Bodentiere eines Kalkbuchenwaldes: Ein Ökosystemforschungsprojekt (Zur Funktion der Fauna in einem Mullbuchenwald 1). Verh. Ges. Ökol. 17: 203-211.

Schrader, S. (1993): Gangbildung, Kotproduktion und Schleimausscheidung - Beiträge verschiedener Regenwurmarten zur Entwicklung des Bodengefüges. Dissertation, TU Braunschweig, 103 S.

Schrader, S. & Wolfarth, F. (2011): Fusarien im Strohmulch bei konservierender Bodenbearbeitung - Regenwürmer als natürliche Gegenspieler. LOP 5/2011: 11 – 15.

© Naturforschende Gesellschaft zu Freiburg im Breisgau c/o Institut für Geo- und Umweltnaturwissenschaften; download www.zobodat.at

Schulz, E. & Graff, O. (1977): Zur Bewertung von Regenwurmmehl aus *Eisenia foetida* als Eiweißfuttermittel. - Landbauforsch. Völkenrode 27: 216-218.

Sharpley, A. N. Syers, J. K. & Springett, J. A. (1979): Effect of surface-casting earthworms on the transport of phosphorus and nitrogen in surface runoff from pasture. Soil Biol. & Biochem. 11: 459-462.

Shaw, C. & Pawluk, S. (1986): Faecal microbiology of *Octolasion tyrtaeum*, *Aporrectodea turgida* and *Lumbricus terrestris* and its relation to the carbon budgets of three artificial soils. Pedobiologia 29: 377-389.

Statistisches Landesamt Baden-Württemberg 2008a: www.statistik-bw.de

Stephens, P. M., Davoren C. W. & Edwards, C. A. (1997): Influence of the earthworms Aporrectodea trapezoides and A. rosea on the disease severity of *Rhizoctonia solani* on subterranean clover and ryegrass. Soil Biol. Biochem. 29: 511-516.

Stockdill, S. M. J. (1982): Effects of introduced earthworms on the productivity of New Zealand pastures. Pedobiologia 24: 29-35.

Stumpf, T.,Strassmeyer, J., Horney, P., Herwig, N. & Stendewl, U. (2015): Kupferverfügbarkeiten in Sonderkulturen – eine einfache Erstabschätzung des Leaching-Alterungsfaktors am Beispiel Qualitätsweinbau. Journal für Kulturpflanzen 67 (1): 22-31.

Terhivuo, J. (1989): The Lumbricidae of Southern Finland: Species Assemblages, Numbers, Biomass and Respiration. Annales Zoologici Fennici 26: 1-23.

Thielemann, U. (1986): Elektrischer Regenwurmfang mit der Oktett-Methode. Pedobiologia 29: 296-302.

Tischer, S. (2007): Erfassung und Bewertung von Lumbricidenvorkommen sowie deren Schwermetallgehalte auf BDF von Sachsen-Anhalt und Thüringen Bodenbiologische Bewertung von Boden-Dauerbeobachtungsflächen (BDF) anhand von Lumbriciden, UBA-Texte 34/07: 54-71

Umweltministerium Baden-Württemberg (1995): Bewertung von Böden nach ihrer Leistungsfähigkeit. Reihe ‚Luft Boden Abfall', Heft 31: 1-34.

Vollmer, T. (1999): Die Regenwurmfauna naturnaher Waldökosysteme Südwestdeutschlands und ihre Abhängigkeit von Standortsfaktoren. Diplomarbeit, Institut für Bodenkunde und Standortslehre der Universität Hohenheim, Stuttgart, 130 S.

Wattendorf, P., Ehrmann, E. & Konold, W. (2015): Langzeituntersuchungen von Boden, Vegetation und Wasserhaushalt von Deponie-Rekultivierungsschichten. Bericht im Auftrag des Landes Baden-Württemberg (BW-Plus-Projekt), 62 S.

Wilcke, D. E. (1953): Über die vertikale Verteilung der Lumbriciden im Boden. Z. Morph. u. Ökol. Tiere 41:372-385.

Zaborski, E. R. (2003): Allylisothiocyanate: an alternative chemical expellant for sampling earthworms. Applied Soil Ecology 22: 87–95

© Naturforschende Gesellschaft zu Freiburg im Breisgau c/o Institut für Geo- und Umweltnaturwissenschaften; download www.zobodat.at

Dank

Die Regenwurmdaten wurden im Wesentlichen im Rahmen von Projekten erhoben, die vom Land Baden-Württemberg gefördert wurden. Die Erfassung von Regenwürmern in Wäldern Baden-Württembergs wurde von der LUBW und dem Umweltministerium beauftragt. Dafür und für die sehr gute Zusammenarbeit möchte ich mich bei Kay Rahtkens, Werner Bohro, Heinrich Hartig und Prof. Dr. Günther Turian sehr herzlich bedanken. Die Untersuchung der Regenwurmfauna von Äckern und ihr Einfluss auf das Bodengefüge erfolgte im Auftrag der LTZ Augustenberg. Für die Möglichkeit, Regenwürmer im Rahmen des Langzeitversuches „Systemvergleich Bodenbearbeitung“ untersuchen zu können, möchte ich mich bei Dr. Erich Unterseher, Thomas Würfel, Dr. Holger Flaig und Dr. Jörn Breuer ebenfalls sehr herzlich bedanken.

Für die tatkräftige Mitarbeit bei den umfangreichen Geländeuntersuchungen bin ich Dr. Peter Wattendorf, Tobias Vollmer und Michael Hofmann besonderen Dank schuldig.

Für die kritische Durchsicht des umfangreichen Manuskripts möchte ich mich bei Birgit Kury, Dr. Peter Wattendorf, Prof. Dr. Werner Konold und PD Dr. Ursula Leppig herzlich bedanken.

Bildnachweis:
Alle Bilder wurden von Otto Ehrmann fotografiert.

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: Berichte der naturforschenden Gesellschaft zu Freiburg im Breisgau

Jahr/Year: 2015

Band/Volume: 105

Autor(en)/Author(s): Ehrmann Otto

Artikel/Article: Regenwürmer in den Böden Baden- Württembergs - Vorkommen, Gefährdung und Bedeutung für die Bodenfruchtbarkeit 125-176