

Auswirkungen des Klimawandels auf die Regenwürmer Baden- Württembergs

 Literaturstudie zur Bedeutung von Regenwürmern und den möglichen Auswirkungen des Klimawandels auf Arten und Populationen der Regenwürmer

ID U13-M325-N08
ID-U13-M315-N08

Der Bericht ist eine Vorstudie zu der Frage, welche Auswirkungen der Klimawandel auf Regenwürmer in Baden-Württemberg haben könnte. Nach einer Beschreibung von Vorkommen und Autökologie der heimischen Regenwurmfauna, wird der Frage im Einzelnen nachgegangen, in wieweit Temperaturerhöhung, Temperatur und Niederschlagsextreme (insbesondere Trockenheit) sich auf das Überleben von Regenwürmern auswirken kann. Abschließend werden Empfehlungen für ein Bio-monitoring von Regenwürmern aufgezeigt.

Regenwürmer sind die Tiergruppe in Baden-Württemberg mit der höchsten Biomasse. Sie sind an fast allen Standorten in Baden-Württemberg nachzuweisen. Meist kommen sie in Böden zwar zahlreich (individuenreich) vor, allerdings nur in wenigen Arten.

Sie sind für viele Prozesse in Böden, aber auch für das jeweilige Ökosystem insgesamt von großer Bedeutung. Aufgrund ihrer Lebensweise haben sie in einer großen Anzahl von Böden eine wesentliche Funktion beim



Abbildung 1: *Lumbricus rubellus* in einem Hohlraum unter einem (entfernten) Stein - vgl. Seite 7



Abbau der organischen Substanz und beim Aufbau des Bodengefüges. Bedeutung hat hierbei vor allem die Bodenlockerung und die Anlage von tiefreichenden Röhren. Dadurch kann Wasser bei Starkregen besser in den Boden eindringen (Verminderung der Erosionsgefahr) und Wurzeln können leichter in den Unterboden wachsen (bessere Wasserversorgung in Trockenperioden). Ein Ausfall oder Rückgang der Regenwürmer würde zu deutlichen Ertragseinbußen in der Landwirtschaft führen und erhebliche Störungen in naturnahen Ökosystemen verursachen.

Frost und Trockenheit sind schädlich für Regenwürmer. Bei ungünstigen Bedingungen ziehen sie sich in den Unterboden oder in geschützte Bereiche zurück. In der Regel kann sich die Population aus Eiern in den besser geschützten Kokons wieder aufbauen und regenerieren. Verluste durch Frost sind in Mitteleuropa vermutlich selten, Verluste durch Trockenheit kommen häufiger vor, können aber normalerweise wieder in kurzer Zeit ausgeglichen werden.

KLIMAWANDEL

Sollte sich der Klimawandel fortsetzen, wird er sich unterschiedlich auf Regenwürmer auswirken. Die milderen Winter sind sicher positiv für die Regenwürmer, sie können über einen längeren Zeitraum aktiv sein und die Verluste durch Frost werden noch geringer sein. Wärmere Sommer werden sich hingegen ungünstig auswirken, wenn sie mit langanhaltenden Trockenperioden einhergehen. Dies zeigt sich daran, dass trockene Standorte schon jetzt eine geringere Regenwurmpopulation aufweisen als feuchtere oder kühlere Standorte. Besonders ungünstig sind extreme Sommer wie 2003, davon erholt sich die Regenwurmpopulation an trockeneren Standorten erst nach Jahren. Katastrophal könnten sich zwei extrem trockene Jahre in Folge auswirken. Dies könnte zu einem weitgehenden Ausfall der Regenwürmer an vielen Standorten führen. Die Auswirkungen des Klimawandels müssen aber regional differenziert

betrachtet werden. In den Höhenlagen könnte sich der Klimawandel vielleicht sogar positiv bemerkbar machen. In den mittleren und tieferen Regionen des Landes wird die einheimische Regenwurmfaua eher negativ beeinträchtigt werden.

Ein sehr kritischer Faktor ist bei Regenwürmern die Wiederbesiedlung nach einem Populationszusammenbruch. Regenwurmpopulationen breiten sich aktiv nur mit einer Geschwindigkeit von < 10 m /Jahr aus und die passive Verbreitung spielt in Zeiträumen von Jahren, sogar von Jahrzehnten keine große Rolle. Daher kann die Einwanderung besser an höhere Temperaturen angepasster Arten aus dem Süden nicht mit der Geschwindigkeit des Klimawandels mithalten und auch die Wiederbesiedlung nach einem Populationszusammenbruch, ausgehend von feuchteren Standorten in der Landschaft, benötigt Jahre.

ANPASSUNGSMASSNAHMEN

Negative Folgen des Klimawandels auf Regenwurmpopulationen können mindestens teilweise kompensiert werden. Es sind eine ganze Reihe von Maßnahmen möglich die meist auch nicht aufwändig sind, aber zum Teil durch wissenschaftliche Untersuchungen begleitet werden müssen.

Durch die Vergrößerung der Schläge und das Entfernen von Strukturen wie Hecken und Einzelbäumen hat sich die Vielfalt der Agrarlandschaft drastisch verringert. Aufgrund der Spezialisierung der landwirtschaftlichen Betriebe werden nur noch wenige Kulturpflanzen angebaut. Diese uniformen Bedingungen vermindern die Chance auf das Überleben von Regenwurmpopulationen bei extremer Witterung. Die Erhaltung oder Schaffung kleinerer Schläge, windgeschützter, krautreicher Waldsäume, feuchter Senken und Gräben sowie andere Gewässer mit einem breiten ungenutzten Randstreifen erhöhen die Überlebenschancen von Regenwürmern in einer Landschaft.

BIOMONITORING REGENWÜRMER

Überfällig ist die Einrichtung eines Regenwurmmonitorings an einigen Wald- und Grünland-Dauerbeobachtungsflächen wie seit 2011 an den Premiumstandorten der Medienübergreifenden Umweltbeobachtung Baden-Württembergs und eine vollständige Zusammenstellung der schon vorhandenen Daten über Regenwürmer in Baden-Württemberg.

IMPRESSUM

HERAUSGEBER	LUBW Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg Postfach 10 01 63, 76231 Karlsruhe, www.lubw.baden-wuerttemberg.de
BEARBEITUNG	Dr. Otto Ehrmann, Büro für Bodenmikromorphologie und Bodenbiologie, Münster 12, 97993 Creglingen. Für den Inhalt sind die Bearbeiter verantwortlich. Die geäußerten Interpretationen und Einschätzungen müssen nicht mit denen des Herausgebers übereinstimmen.
BILDNACHWEIS	Dr. Otto Ehrmann, http://www.bildarchiv-boden.de/
AUFTRAGGEBER	LUBW, Referat Medienübergreifende Umweltbeobachtung, Projekt ID WV162 Kontakt: Kay Rahtkens, kay.rahtkens@lubw.bwl.de , Tel. 0721 56001279
BEZUG	http://www.fachdokumente.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/91063/ ID Umweltbeobachtung U13-M325-N08
STAND	Oktober 2008, Internetausgabe Februar 2012

Nachdruck und Verteilung für kommerzielle Zwecke – auch auszugsweise – ist nur mit Zustimmung des Herausgebers unter Quellenangabe und Überlassung von Belegexemplaren gestattet.

1.	Einleitung.....	5
1.1.	Literaturrecherche - bisherige Ergebnisse	5
1.2.	Beschreibung der 3 ökologischen Gruppen.....	6
2.	Vorkommen von Regenwürmern in Baden-Württemberg	9
2.1.	Arten, Abundanzen, Biomassen in verschiedenen Ökosystemen	9
2.2.	Vergleich verschiedener Landschaften Baden-Württembergs.....	13
2.3.	Vergleich mit dem Vorkommen in anderen Bundesländern.....	16
2.4.	Vergleich von Regenwürmern mit dem Vorkommen von anderen Bodentieren.....	18
2.5.	Vergleich von Regenwürmern mit dem Vorkommen von anderen Organismen in Baden-Württemberg	20
2.6.	Fazit.....	20
3.	Bedeutung der Regenwürmer für Bodenstruktur und Nährstoffhaushalt	21
3.1.	Wirkungen der Regenwürmer auf das Bodengefüge	21
3.2.	Nährstoffhaushalt.....	29
3.3.	Phytosanitäre Wirkungen.....	30
3.4.	Wie groß ist der positive Effekt der Regenwürmer?.....	30
3.5.	Regenwürmer als Nahrungsquelle für andere Tiere	32
3.6.	Substituierbarkeit der Leistungen der Regenwürmer.....	34
3.7.	Schäden bei einem Ausfall/Reduktion der Regenwürmer.....	35
3.8.	Fazit.....	37
4.	Mögliche Auswirkungen der Klimaänderung auf Regenwürmer	38
4.1.	Anstieg der Temperatur	38
4.2.	Änderung der Bodenfeuchte	40
4.3.	Anstieg des CO ₂ - Gehaltes	41
4.4.	Vorkommen der wichtigsten Arten Baden-Württembergs in anderen Klimaten.....	42
4.5.	Betrachtung von Zeitreihen – welchen Einfluss hat die Witterung?	43
4.6.	Prognose für 2 Beispielsregionen (Kraichgau und Schwäb. Alb).....	46
4.7.	Fazit: mögliche Reaktion von Regenwurmpopulationen bei verschiedenen Szenarien	50
5.	Probleme der (Wieder)Besiedlung.....	51
5.1.	aktive Wanderung von Individuen.....	51
5.2.	Wanderung von Regenwurmpopulationen.....	51
5.3.	Fazit Besiedlung	53

6.	Vorschläge für die Dauerbeobachtung von Regenwürmern	54
6.1.	derzeitige Untersuchungskonzepte in anderen Bundesländern.....	54
6.2.	Konzept für Regenwurmuntersuchungen in Baden-Württemberg	55
7.	Diskussion von möglichen Anpassungsmaßnahmen.....	57
7.1.	allgemeine Maßnahmen	57
7.2.	differenziert nach Nutzungstyp	57
7.3.	Aussetzen von Regenwürmern.....	58
7.4.	Fazit.....	58
8.	Forschungsbedarf.....	59
8.1.	Zusammenstellung der Regenwurmfauna Baden-Württembergs	59
8.2.	Einrichtung von Dauerbeobachtungsflächen	59
8.3.	spezielle Untersuchungen zum Klimawandel	59
8.4.	weitere Untersuchungen.....	59
9.	Literaturverzeichnis.....	60

1. Einleitung

Die Modellrechnungen zum Klimawandel in Baden-Württemberg (KLIWA 2006) prognostizieren für das ganze Land mildere, niederschlagsreichere Winter und wärmere Sommer mit meist geringeren Niederschlägen. Daher wird sich der Bodenwasserhaushalt erheblich verändern. Veränderungen der Standortbedingungen ziehen zwangsläufig Umbrüche in der Pflanzen- und Tierwelt nach sich.

Regenwürmer sind vermutlich die Tiergruppe mit der höchsten Biomasse in Baden-Württemberg und von großer Bedeutung für viele Prozesse im Ökosystem. Unter einem veränderten Klima werden sie besonders wichtig werden (Sicherung der Infiltration bei Starkregen und Durchwurzelung in Trockenphasen). Gleichzeitig werden sie als Tiere die im feuchten Boden aktiv sind besonders von Trockenperioden betroffen sein.

In dieser Vorstudie sollen zusammengestellt werden:

- Übersicht über das Vorkommen von Regenwürmern in Baden-Württemberg
- Bedeutung der Regenwürmer für Bodenstruktur und Nährstoffhaushalt
- mögliche Auswirkungen der Klimaänderung auf Regenwürmer
- Veränderung von Standorten infolge einer möglichen Veränderung der Regenwurmpopulation
- Vorschläge für die Auswahl von Dauerbeobachtungsflächen
- Diskussion von möglichen Anpassungsmaßnahmen

1.1. Literaturrecherche - bisherige Ergebnisse

Die Durchsicht der aktuellen wissenschaftlichen Literatur zum Thema Klimawandel und Regenwürmer (ca. 900 Artikel in internationalen Journals über Regenwürmer) lässt sich einfach zusammenfassen: Es gibt dort so gut wie keine Literatur zum Thema Regenwürmer – Klimawandel.

Es wurden lediglich drei Literaturstellen gefunden. In einer Arbeit wird auf die Auswirkungen eines veränderten Überflutungsregimes am Unterrhein auf Regenwürmer hingewiesen (THONON & KLOK, 2007). Die zweite Arbeit zeigt eine veränderte (leichte erhöhte) Schwermetalltoxizität bei höheren Bodentemperaturen (KHAN et al. 2007). Außerdem wurden von EHRMANN & EMMERLING (2007) langjährige Zeitreihen zur Entwicklung von Regenwurmpopulationen vorgestellt.

1.2. Beschreibung der 3 ökologischen Gruppen

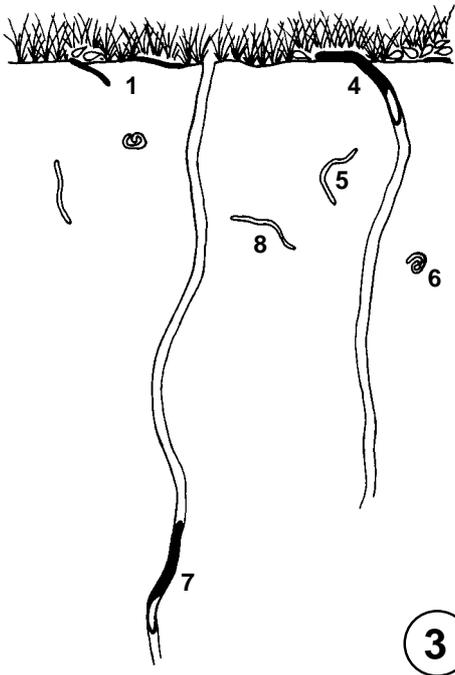
Die Regenwürmer können – vereinfacht – in drei ökologische Gruppen eingeteilt werden. Die wesentlichen Eigenschaften sind in Tab. 1 zusammengestellt. Fotos von verschiedenen Arten sind auf Bildtafel 1 zusammengestellt.

Tab. 1: ökologische Gruppen von Regenwürmern

Eigenschaften	Ökologische Artengruppe		
	epigäisch	anezisch	endogäisch
Länge adulter Tiere [mm]*	20-120	150-500	30-150
Lebendgewicht adulter Tiere (g) *	0,02-2	2-30	0,2-2,5
Pigmentierung	bräunlich-rot, dunkel	schwärzlich-braun	unpigmentiert
Verteilung des Pigmentes	± gleichmäßig über den ganzen Körper	Vorderteil, besonders dorsal	
Grabmuskulatur	wenig entwickelt	stark entwickelt	entwickelt
Lebensdauer	kurz	lang	mittel
Lebensraum	Streu, Humusaufgabe	gesamtes Bodenprofil bis zu mehreren Metern Tiefe	Mineralboden, vor allem im intensiv durchwurzelten Bereich
Nahrung	kleinere, vorzeretzte Streu	vorzeretzte Streu	organische Feinsubstanz des Mineralbodens
Ort der Nahrungsaufnahme	Bodenoberfläche	Bodenoberfläche (Mineralboden)	Mineralboden
Anteil mineralischen Materials am Darminhalt	meist < 50 %	meist < 50 %	meist > 50 %
Überdauerung ungünstiger Perioden	als Kokon	z.T. Diapause, z.T. ohne Ruhestadien	oft Quieszenz
Gefährdung durch Räuber	groß	mäßig	schwach
Röhrenart	keine oder temporär	dauerhafte Wohnröhre	temporär
typische Arten im Untersuchungsgebiet	<i>L. castaneus</i> , <i>D. pygmaea</i> , <i>D. octaedra</i> , <i>D. rubidus</i> , <i>E. tetraedra</i>	<i>L. terrestris</i> <i>L. polyphemus</i>	<i>A. caliginosa</i> , <i>A. icterica</i> <i>A. rosea</i> , <i>A. handlirschi</i> , <i>A. limicola</i> , <i>O. lacteum</i> , <i>O. cyaneum</i>
weniger typische Arten (Übergang zu)	<i>L. rubellus</i> (anez.)	<i>A. longa</i> (endog.), <i>L. r. friendoides</i> (epig.)	<i>A. chlorotica</i> (epig.)

Quelle: Tabelle nach DUNGER (1983) und EHRMANN et al. 2002.

*die Angaben beziehen sich auf in Baden-Württemberg gefundenen Arten



Bildtafel 1: Beispiele zu ökologischen Gruppen von Regenwürmern

Bild 1: *Lumbricus rubellus* in einem Hohlraum unter einem (entfernten) Stein. Dieser epigäische Wurm ist aufgrund seiner oberflächennahen Lebensweise durchgehend dunkel pigmentiert. Das Vorhandensein eines Clitellums (rötliche Stelle am Ende des ersten Drittels) weist auf ein geschlechtsreifes Tier hin.

Bild 2: Zwei anezische *Lumbricus terrestris* bei der Paarung an der Bodenoberfläche.

Die Regenwürmer tauschen bei der Paarung Sperma aus. Die Befruchtung der Eizelle erfolgt erst bei der Kokonbildung. Die Tiere bleiben bei der Paarung mit dem Hinterende in der Röhre, bei Störungen können sie sich schnell zurückziehen.

Bild 3: Schematische Darstellung der Lebensbereiche verschiedener ökologischer Gruppen.

Das Bild wurde aufgrund eigener Erfahrungen und Kenntnisse aus der Literatur gezeichnet. Epigäische Arten (1) sind durchgehend dunkel gezeichnet, bei anezischen (4, 7) ist nur das Hinterteil hell, wohingegen von den endogäischen Regenwürmern (5, 6, 8) nur die Umrißlinien gezeichnet sind. Epigäische Regenwürmer leben meist an der Bodenoberfläche, die endogäischen im Oberboden. Anezische Regenwürmer kommen zur Paarung und Nahrungsaufnahme an die Bodenoberfläche, sie können sich aber tief in den Unterboden zurückziehen. Die Zahlen neben den Regenwürmern weisen auch darauf hin, daß ein Bild mit der gleichen Nr. vorhanden ist.

Bild 4: *Lumbricus terrestris* beim Einziehen eines Laubblattes.

Anezische Regenwürmer legen eine dauerhafte, ± senkrecht orientierte Wohnröhre mit Mündung zur Bodenoberfläche an. Dorthin kommen sie zur Nahrungsaufnahme, verlassen dabei aber in der Regel ihre Wohnröhre nur mit dem Vorderteil, so daß die Fläche, von der sie Nahrung sammeln können, begrenzt ist.

Die **Bilder 5 und 6** zeigen endogäische Regenwürmer.

Auf Bild 5 ist *Aporrectodea rosea* im Ruhestadium zu sehen. Das Tier hat eine kleine Höhle gebildet und sie mit Schleim ausgekleidet. Darin kann es Trockenperioden überdauern.

Aporrectodea icterica (Bild 6) wurde in natürlicher Lage im Oberboden aufgenommen. Dieses Exemplar hat kein Röhrensystem und konnte deshalb auch seine Position nicht verlassen. *A. icterica* frißt sich durch den Boden und verfüllt die Röhre am Hinterende wieder.

Bild 7: *Lumbricus terrestris* am unteren Ende seiner Wohnröhre in 130 cm Tiefe.

Vom Tier ist nur die Kopfspitze zu sehen, der Körper ist noch in der Röhre, deren Ende bis ins Stauwasser reicht. Das Tier kann sich lange im Wasser aufhalten, wenn ausreichend Sauerstoff darin gelöst ist. Die Röhre hebt sich aufgrund der dunklen Humustapete deutlich von der umgebenden Bodenmatrix ab.

Bild 8: *Octolasion lacteum*, ein großer endogäischer Wurm (Länge ca. 15 cm).

Typisch für die meisten Exemplare von *O. lacteum* ist das fast völlige Fehlen einer Pigmentierung und die gelbe Schwanzspitze. Normalerweise lebt diese Art im Boden. Das Foto wurde in der Nacht nach einem Starkregen aufgenommen. Der Regenwurm nutzt die feuchten Bedingungen an der Bodenoberfläche zur Wanderung und Besiedelung neuer Habitats.

2. Vorkommen von Regenwürmern in Baden-Württemberg

2.1. Arten, Abundanzen, Biomassen in verschiedenen Ökosystemen

Datenquellen

Datenquellen sind in der Regel eigene Untersuchungen aus verschiedenen Projekten oder unabhängig von diesen durchgeführten Untersuchungen der letzten zwanzig Jahre (Zeitraum 1988 – 2008). Außerdem werden teilweise die Ergebnisse von zwei betreuten Diplomarbeiten (VOLLMER 1999, ALBRECHT 1998) verwendet. Eine Reihe von Standorten wurde mehrfach untersucht. In diesem Fall wurde nur die Erstuntersuchung verwendet. An einigen Standorten wurden verschiedenen Varianten nebeneinander untersucht (z.B. Direktsaat vs. Pflug), in solchen Fällen wurde nur die ortsübliche Variante verwendet. Da die Regenwurmuntersuchungen der letzten 20 Jahre meist nicht primär das Ziel hatten die Regenwurmfaua Baden-Württembergs zu ermitteln, sind die Flächen naturgemäß nicht repräsentativ übers Land verteilt, auch werden nicht alle Nutzungstypen anteilig erfaßt. Durch die (für Regenwurmuntersuchungen) große Anzahl an Standorten (192) ergibt sich aber für die meisten Regionen eine gute Übersicht. Nicht verwendet werden konnten die Daten der relativ umfangreichen Arbeiten von GEFU 1993 (Integriertes Rheinprogramm) und BELOTTI 1997 (Regenwürmer-Kupfer) sowie die Daten der LUBW (Zielsetzung Bioindikation mit *L. rubellus*). Bei diesen Arbeiten wurde entweder nur die Elektromethode verwendet (GEFU 1993, LUBW) oder nur die Handauslese (Belotti). Eine annähernd vollständige Erfassung der Regenwürmer ist so in der Regel nicht möglich. Die Daten sind trotzdem wertvoll als Positivnachweise von Arten.

Eine räumlich differenzierte Darstellung des Artenvorkommens ist nicht das Ziel dieser Übersichtsarbeit, sondern sollte Teil einer weiterführenden Untersuchung sein.

2.1.1. Kommen in allen Böden Baden-Württembergs Regenwürmer vor?

Von den untersuchten 192 Standorten in Baden-Württemberg waren nur 3 regenwurmfrei (Abb. 1). Dabei handelte es sich um die Greens von 2 Golfplätzen und um einen Acker im Kraichgau. Auf den Greens von Golfplätzen sind Regenwürmer unerwünscht, daher werden Regenwurmpopulationen durch verschiedene Maßnahmen minimiert (BAKER & BINNS, 1998).

2.1.2. Arteninventar

In Baden-Württemberg kommen mindestens 27 Regenwurmartarten vor (Tab. 2). Im Mittel wurden aber nur 4,2 Regenwurmartarten je Standort gefunden. Dieser an sich sehr niedrige Wert ist für Regenwürmer "normal" – es kommen immer nur wenige Regenwurmartarten an einem Standort vor. In Bayern wurden ähnlich wenige Arten gefunden (BAUCHHENS 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 Bodenfunktion. Der Ausfall einer einzigen Art kann schon die Eigenschaften von Standorten verändern, vor allem wenn es sich um eine anezische Art handelt.

Differenziert man die Artenausstattung nach Nutzung, so zeigt sich, dass Grünland die meisten Arten aufweist (5,2). Im Acker (4,2) und Wald (3,8) kommen weniger Arten vor.

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% - ohne den 2 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. 1).

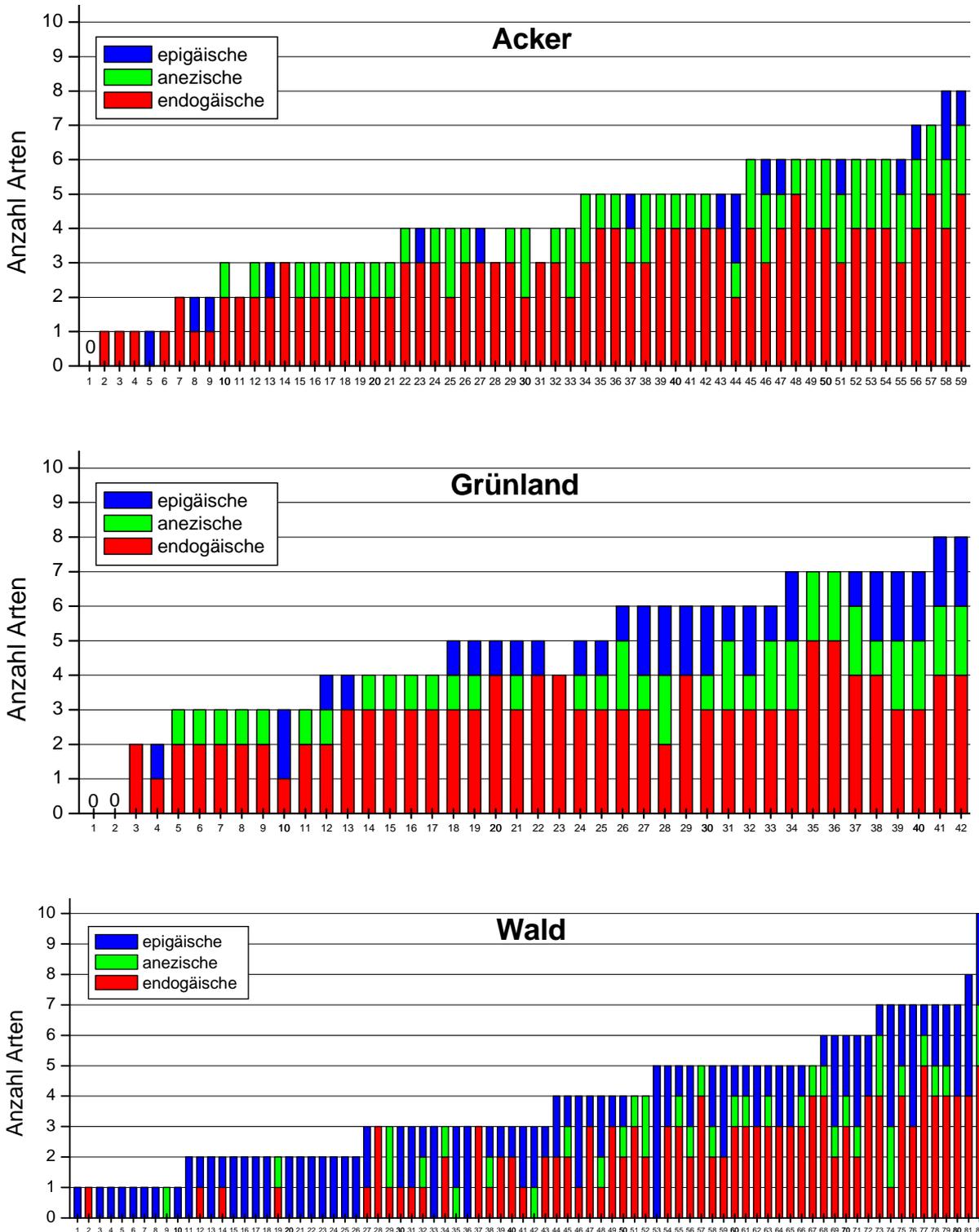


Abb. 1: Anzahl der Regenwurmart in Acker, Grünland und Wald.
Die Standorte sind nach zunehmender Artenzahl geordnet.

Tab. 2: Regenwurmarten in Baden-Württemberg

(die Tabelle basiert auf verschiedenen Untersuchungen von EHRMANN)

	Biomasse adulte [g]	Stetigkeit				Ø Biomasse [g/m ²]				Ø Abundanz [Indiv./m ²]				
		Ø	A	G	W	Ø	A	G	W	Ø	A	G	W	Ø
epigäische														
<i>Lumbricus rubellus</i>	1,07	27	57	71	53	1	6	9	5	2	12	16	10	
<i>Lumbricus castaneus</i>	0,18	3	33	11	13	0	1	0	0	0	4	1	1	
<i>Eiseniella tetraedra</i>	0,07	/	10	11	8	/	0	0	0	/	4	7	4	
<i>Dendrobaena attemsi</i>	0,11	/	/	5	2	/	/	0	0	/	/	2	1	
<i>Dendrobaena octaedra</i>	0,14	/	2	35	16	/	0	1	0	/	0	4	2	
<i>Dendrobaena rubida</i>	0,12	/	/	18	8	/	/	0	0	/	/	0	0	
<i>Dendrobaena pygmaea</i>	0,02	/	/	5	2	/	/	0	0	/	/	0	0	
anezische														
<i>Dendrobaena platyura</i>	3,73	/	2	/	1	/	0	/	0	/	0	/	0	
<i>L. rubellus friendoides</i>	2,50	/	/	12	5	/	/	2	1	/	/	1	0	
<i>Lumbricus terrestris</i>	4,01	66	79	23	50	11	32	7	14	18	24	4	13	
<i>Lumbricus polyphemus</i>	10,94	/	/	2	1	/	/	1	0	/	/	0	0	
<i>Aporrectodea longa</i>	2,04	36	33	6	21	6	20	1	6	7	18	0	6	
endogäische														
<i>Aporrectodea caliginosa</i>	0,47	90	90	35	66	14	28	4	13	54	102	13	47	
<i>Allolobophora chlorotica</i>	0,28	32	26	4	18	3	1	0	1	18	6	0	7	
<i>Aporrectodea handlirschi</i>	0,23	3	2	17	9	0	0	1	1	0	0	11	5	
<i>Aporrectodea rosea</i>	0,23	69	93	49	66	3	10	4	5	21	74	30	37	
<i>Aporrectodea icterica</i>	0,76	15	17	/	8	1	2	/	1	3	3	/	2	
<i>Aporrectodea limicola</i>	0,33	/	/	2	1	/	/	0	0	/	/	1	1	
<i>Aporrectodea miniscula</i>	0,04	2	/	/	1	0	/	/	0	0	/	/	0	
<i>Octolaseum cyaneum</i>	2,01	5	5	7	6	1	1	1	1	0	0	1	0	
<i>Octolaseum lacteum</i>	1,06	32	50	43	41	3	9	10	7	6	16	19	14	

Sehr kleine juvenile Tiere konnten manchmal nicht bis zur Art bestimmt werden. Diese sind in der Tabelle nicht enthalten. Außerdem wurden im Rahmen eigener Untersuchungen wahrscheinlich noch *A. georgii*, *A. jassyensis* und eine *Nicodrilus*-Art gefunden. Eine gesicherte Bestimmung ist aber aufgrund unzureichender Bestimmungsschlüssel nicht möglich. Sicher in Baden-Württemberg kommen auch noch *L. badensis* und *L. friendi* (LAMPARSKI 1985) sowie *L. festivus* (GEFU 1993) vor.

Die in Baden-Württemberg vorkommenden Regenwurmarten kann man hinsichtlich ihrer Bedeutung für Nährstoffhaushalt und Bodenstruktur vereinfacht in drei Gruppen einteilen (Maßstab für die Einteilung ist die durchschnittliche Biomasse):

a) sehr große Bedeutung

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

b) mittlere Bedeutung

- *Lumbricus rubellus* (5 g/m²)
- *Aporrectodea longa* (6 g/m²)
- *Aporrectodea rosea* (5 g/m²)
- *Octolaseum 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 *L. badensis* und *L. polyphemus* an manchen Waldstandorten im Südschwarzwald bzw. in den weniger versauerten Wäldern auf der Schwäbischen Alb große Bedeutung für Streuabbau und Bodenstruktur. Die sehr kleinen Dendrobanena-Arten können in versauerten Wäldern in der Rheinebene oder im Odenwald in großer Zahl vorkommen und dann die Streuauflage beeinflussen.

2.1.3. Abundanzen und Biomassen

Die meisten Regenwürmer und die größten Biomassen werden im Mittel im Grünland gefunden. Deutlich niedrigere Werte weisen Äcker und Wälder auf (Abb. 2).

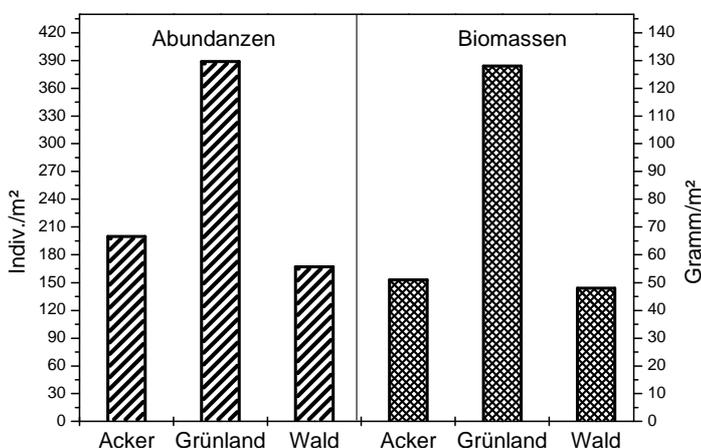


Abb. 2: Abundanzen und Biomassen in Acker, Grünland und Wald

2.2. Vergleich verschiedener Landschaften Baden-Württembergs

Insgesamt wurden 192 Standorte in Baden-Württemberg untersucht. Diese hohe Zahl macht es möglich, eine Differenzierung nach den naturräumlichen Einheiten Baden-Württembergs zu versuchen (Tab. 3). Allerdings ist der Untersuchungsstand in versch. Landschaften unterschiedlich. Aus dem Hochrheingebiet gibt es keine Untersuchungen. Die beiden Einheiten "Mainfränkische Platten" und "Fränkisches Keuper-Lias-Land weisen nur sehr geringe Flächenanteile auf, von ihnen liegen ebenfalls keine Daten vor. Sehr gut untersucht ist mit 36 Aufnahmen hingegen die Filder. Wenig untersuchte Landschaften werden zwar aufgeführt (z.B. südlicher Oberrhein mit n=1) aber nicht interpretiert. Zu beachten ist außerdem, dass die Daten ein erhebliches "Rauschen" aufgrund von unterschiedlichen Beprobungsterminen enthalten. Dadurch werden Unterschiede, vor allem bei den Parametern Anzahl und Biomasse, weniger bei den Parametern Artenzahl und ökologische Gruppe, verwischt. Auch gibt es innerhalb einer Landschaft erhebliche Differenzen. Im nördlichen Oberrheintal gibt es z.B. aufgrund von ungünstiger Bodenart und Trockenheit wenig Regenwürmer – in einem entwässerten Niedermoor unter Wald nördlich Karlsruhe wurden aber über 1000 Regenwürmer je m² gefunden – dies ist der höchste Wert für Wälder in Baden-Württemberg.

Um einen Klimaeinfluss zu ermitteln sollten ähnliche Böden in verschiedenen Landschaften miteinander verglichen werden. Also z.B. eine Rendzina aus Muschelkalk im Trockengebiet des Tauberlandes mit einer Rendzina auf der Schwäbischen Alb. Diese Differenzierung übersteigt aber den Rahmen dieser Vorstudie.

Tab. 3: Regenwürmer in versch. Landschaften Baden-Württembergs

Typ	n Standorte	Anzahl Regenwurmartentypen				Biomassen [g/m ²]			Abundanzen [Indiv. /m ²]		
		epigäische	anezische	endogäische	Summe	epig. + anez.	endogäische	Summe	epig. + anez.	endogäische	Summe
alle Standorte											
ØBaWü	192	1,0	0,8	2,3	4,2	31	34	66	58	166	224
differenziert nach Nutzung											
Acker	59	0,3	1,0	2,8	4,2	20	32	51	36	168	200
Grünland	42	1,0	1,2	3,0	5,2	67	61	128	95	295	389
Wald	82	1,6	0,5	1,7	3,8	23	24	48	59	106	167
Voralpines Hügelland - Hegau											
Acker	2	0,5	0,5	3,0	4,0	9	60	70	43	329	373
Grünland	6	1,5	1,8	2,8	6,2	90	52	147	129	276	413
Wald	8	1,0	0,6	2,9	4,5	11	66	78	17	197	217
Mittelwert	17	1,1	1,1	2,9	5,1	38	57	98	60	241	306
Voralpines Hügelland – alle anderen Standorte											
Grünland	7	1,4	0,7	3,0	5,1	59	54	113	98	275	371
Wald	4	1,3	0,5	1,3	3,0	6	7	13	13	41	57
Mittelwert	12	1,4	0,8	2,4	4,6	39	36	75	64	191	255
Schwäbische Alb											
Acker	5	0,4	0,8	3,0	4,4	21	48	70	27	247	279

Grünland	4	1,3	1,0	3,0	5,3	53	104	157	112	494	606
Wald	7	0,6	1,0	2,7	4,3	51	38	89	51	144	197
Mittelwert	16	0,7	0,9	2,9	4,6	42	57	100	59	264	325
Schwäbisches Keuper-Lias-Land – nur Filder											
Acker	21	0,3	1,8	3,5	5,6	33	33	66	56	197	254
Grünland	7	0,9	1,9	3,9	6,6	79	75	154	100	336	436
Wald	8	1,6	0,6	2,1	4,4	21	28	49	51	86	137
Mittelwert	36	0,7	1,6	3,3	5,5	39	40	80	63	200	264
Schwäbisches Keuper-Lias-Land – alle anderen Standorte											
Acker	3	0,7	0,7	2,3	3,7	30	32	52	19	139	152
Wald	20	1,8	0,5	1,8	4,0	29	22	51	72	107	183
Mittelwert	23	1,6	0,5	1,9	4,0	29	23	51	67	111	179
Neckar u. Tauber Gäuplatten - Hohenlohe											
Acker	8	0,0	0,9	3,5	4,4	14	42	56	36	231	269
Wald	7	1,7	0,6	1,4	3,7	23	14	37	51	35	86
Mittelwert	15	0,8	0,7	2,5	4,1	18	29	47	43	140	184
Neckar u. Tauber Gäuplatten - Kraichgau											
Acker	11	0,5	0,2	1,6	2,4	5	21	25	18	63	77
Grünland	4	0,8	0,5	3,3	4,8	11	59	67	23	197	215
Wald	4	1,0	0,0	2,0	3,0	28	24	53	62	81	143
Mittelwert	19	0,6	0,2	2,1	3,0	12	30	40	31	96	122
Neckar u. Tauber Gäuplatten – südlich Leonberg											
Acker	5	0,2	1,0	2,0	3,2	12	10	23	14	61	74
Grünland	11	0,5	1,1	2,6	4,3	73	59	132	75	304	380
Wald	2	1,0	1,0	2,5	4,5	14	24	38	12	75	90
Golfplatz	7	0,3	0,6	1,7	2,6	7	18	25	16	70	85
Mittelwert	25	0,4	0,9	2,2	3,6	38	35	73	41	171	213
Odenwald											
Wald	1	1,0	0,0	0,0	1,0	6	0	6	118	0	118
Mittelwert	1	1,0	0,0	0,0	1,0	6	0	6	118	0	118
nördl. Oberrhein											
Acker	2	0,5	0,0	1,0	2,0	3	41	24	5	142	76
Grünland	1	1,0	0,0	1,0	2,0	26	0	26	72	4	76
Wald	7	2,4	0,0	0,7	3,1	10	18	29	60	169	236
Mittelwert	10	1,9	0,0	0,8	2,8	11	18	28	50	148	188
mittlerer Oberrhein											
Grünland	1	2,0	2,0	2,0	6,0	148	17	165	174	129	303
Wald	1	4,0	2,0	1,0	7,0	111	35	146	259	277	541
Mittelwert	2	3,0	2,0	1,5	6,5	130	26	155	216	203	422
südlicher Oberrhein											
Acker	1	0,0	1,0	2,0	3,0	23	3	26	24	12	35
Mittelwert	1	0,0	1,0	2,0	3,0	23	3	26	24	12	35
Schwarzwald											
Wald	10	1,9	0,1	0,5	2,5	13	5	19	74	51	130
Mittelwert	10	1,9	0,1	0,5	2,5	13	5	19	74	51	130
Donau-Iller-Lech-Platte											
Acker	1	0,0	0,0	3,0	4,0	1	22	23	6	168	175
Grünland	1	1,0	0,0	4,0	5,0	36	36	72	138	228	366
Wald	3	2,7	0,3	1,3	4,3	27	24	52	89	132	223
Mittelwert	5	1,8	0,2	2,2	4,4	24	26	50	82	158	242

Trotz den vorher genannten Einschränkungen zeigen sich deutliche Unterschiede zwischen verschiedenen Landschaften:

- auffällig ist das Fehlen der für die Bodenstruktur wichtigen tiefgrabenden anezischen Regenwürmer im nördlichen Oberrheingebiet. Relativ wenige gibt es auch im Schwarzwald und im Kraichgau.
- im Schwarzwald gibt es wesentlich weniger Regenwürmer als auf der Schwäbischen Alb. Dies ist eindeutig eine Folge der stärkeren Versauerung im Schwarzwald.
- sehr wenige Regenwürmer gibt es auch im nördlichen Oberrheingebiet – eine Folge von Trockenheit und meist ungünstiger Bodenart. Auch das Kraichgau hat trotz sehr guter Böden eher wenige Regenwürmer - eine Folge der im Sommer oft trockenen Witterung und der intensiver Nutzung.

2.3. Vergleich mit dem Vorkommen in anderen Bundesländern

Vorbemerkung: Regenwürmer sind vermutlich auch in Deutschland die tierischen Organismen mit den größten Biomassen und sie haben einen großen Einfluss auf den Abbau der organischen Substanz und dem Aufbau des Bodengefüges. Daher gibt es relativ viele Untersuchungen zu Regenwürmern, die sich meist mit Fragen der Bewirtschaftung oder mit Schadstoffen beschäftigen. Daneben werden in einigen Bundesländern Regenwürmer auf Bodendauerbeobachtungsflächen untersucht, z.T. ist die Anzahl der untersuchten Flächen sehr hoch (z.B. wurden 109 Äcker in Bayern untersucht). Alle diese vielen Daten wurden nie zusammengefaßt und leider wurden die Untersuchungen z.T. mit verschiedenen Methoden durchgeführt, was die Vergleichbarkeit der Daten einschränkt. Eine Standardisierung der Datenerhebung und Zusammenfassung der bisher ermittelten Daten wäre daher dringend geboten. Entsprechende Anträge an zuständige Stellen wurden bisher negativ beantwortet. "Aktuell" ist daher immer noch die über 50 Jahre alte Arbeit von Graff (1953, "Die Regenwürmer Deutschlands"). Diese beschreibt zwar einen Teil des Arteninventars, enthält aber keine Daten von Populationserhebungen.

Für die folgende Zusammenstellung wurden die bei einem UBA-Workshop in Weimar veröffentlichten Daten verwendet (Tab. 4).

Tab. 4: Regenwürmer in verschiedenen Bundesländern Deutschlands

	Anzahl	Artenzahl	Median		Mittelwert		Verhältnis
			Abundanz	Biomasse	Abundanz	Biomasse	
BDF in Schleswig-Holstein (n=39), Hamburg (n=3) und Nordrhein-Westfalen (n=18) (BEYLICH&GRAEFE 2007, Methode: Formalin+Handauslese+Kempson)							
Acker	35*	k.A.	81	25	k.A.	k.A.	3,2
Grünland	37*	k.A.	255	85	k.A.	k.A.	3
Wald	51*	k.A.	18	2	k.A.	k.A.	9
BDF in Sachsen-Anhalt und Thüringen (TISCHER 2007, Methode: Formalin und teilweise Handauslese)							
Acker	35	k.A.	k.A.	k.A.	32	20	1,6
Grünland	17	k.A.	k.A.	k.A.	64	47	1,4
Wald	21	k.A.	k.A.	k.A.	23	13	1,7
BDF in Bayern (BAUCHHENS 2007, Methode: Formalin)							
Acker	109	3,3	35	20	k.A.	k.A.	1,7
Grünland	21	5,5	44	120	k.A.	k.A.	0,4
Baden-Württemberg (Flächen EHRMANN, Methode: Elektrofang und Handauslese)							
Acker	59	4,2	172	48	200	51	3,9
Grünland	42	5,2	333	103	389	128	3,0
Wald	82	3,8	97	27	167	48	3,5

* einige Standorte wurden mehrfach beprobt, die Daten waren nicht zu trennen, daher weicht hier die Anzahl der Beprobungen von der Zahl der untersuchten Standorte ab

Betrachtet man die Regenwurmdaten aus verschiedenen Bundesländern so zeigt sich dass Baden-Württemberg in der Regel die höchsten Werte aufweist. Dies hat vermutlich folgende Ursachen:

- Die naturräumliche Ausstattung Baden-Württembergs ist für Regenwürmer im Mittel günstig. Die Bundesländer Sachsen-Anhalt und Thüringen weisen zwar gute Böden, aber oft zuwenig Niederschläge auf (Regenschatten von Harz und Thüringer Wald). Norddeutschland ist zwar klimatisch z.T. günstiger als Baden-Württemberg, aber der Anteil an ungünstigen sandigen Flächen ist deutlich größer.
- Die in Baden-Württemberg zur Erfassung der Regenwürmer verwendete Methodenkombination von Elektrofang und Handauslese ist effektiver als die in Bayern und Sachsen-Anhalt/Thüringen verwendete Formalinmethode. Bayern müßte z.B. aufgrund der naturräumlichen Ausstattung ähnliche Werte wie Baden-Württemberg aufweisen. Vor allem die Abundanzen sind aber viel niedriger. So werden im Grünland von Baden-Württemberg 7,5 mal mehr Regenwürmer gefunden als in Bayern! Dies sind keine echten Unterschiede sondern eine Folge der bei der Aufnahme der bayerischen Bodendauerbeobachtungsflächen verwendeten Methode (Formalin). Die Werte für die Biomasse und das Arteninventar werden von der Methodenwahl weniger beeinflusst. Auffällig bei den nur mit Formalin erfaßten Regenwürmern ist das sehr enge Verhältnis von Abundanz/Biomasse. Dies weist darauf hin, dass kleine Regenwürmer weniger gut erfaßt wurden.

Die Werte für die Abundanzen aus Sachsen-Anhalt & Thüringen sowie aus Bayern können daher nur eingeschränkt interpretiert werden. Auch relative Vergleiche (z.B. von Formalinfängen am gleichen Standort zu verschiedenen Terminen) sind problematisch, weil die Effizienz nicht nur geringer sondern auch hoch variabel sein kann. Die Einschränkung der Formalinmethode ist schon lange bekannt (EHRMANN & BABEL 1991), daher sollte diese Methode für Populationserhebungen nur in Kombination mit einer Handauslese verwendet werden und kann eigentlich auf Bodendauerbeobachtungsflächen wegen ihrer negativen Wirkungen auf die Versuchsfläche nur bei reichlich zur Verfügung stehender Fläche verwendet werden (zu den Nebenwirkungen siehe auch EICHINGER et al. 2007).

2.4. Vergleich von Regenwürmern mit dem Vorkommen von anderen Bodentieren

Vergleicht man die Individuenzahlen der wichtigsten Bodentiergruppen (Tab. 5, Dunger 1983) so dominieren mit extrem hohen Individuenzahlen die Vertreter der Mikrofauna. Bei den Biomassen zeigt sich eine deutliche Dominanz der Regenwürmer, die über der Summe aller anderen Bodentiere liegt. Wobei in Baden-Württemberg die Durchschnittswerte für die Regenwürmer mit 66 g/m² mehr als doppelt so hoch wie bei Dunger angegeben sind.

Die Biomassen von Bakterien und Pilzen sind in der Regel höher als die der Regenwürmer (Dunger 1983).

Tab. 5: Individuenzahlen und Lebendgewichte wichtiger Gruppen der Bodenorganismen
(beliebig tiefer Bodenblock von 1 m² Oberfläche)

	Indiv. /m ²		Frischgewicht g/m ²	
	Ø	Optimum	Ø	Optimum
Mikrofauna				
Flagellaten (Geißeltierchen)	10 ⁸	10 ¹⁰	5	150
Rhizopodien (Wurzelfüßer)	10 ⁷	10 ¹⁰		
Cilliaten Wimperntierchen)	10 ⁶	10 ⁸		
Mesofauna				
Nematoden (Fadenwürmer)	10 ⁶	10 ⁸	5	50
Acarinen (Milben)	7x10 ⁴	4x10 ⁵	0,6	4
Apterygoten (Urinsekten)	5x10 ⁴	4x10 ⁵	0,5	4
Makrofauna				
Enchyträen	30000	300000	5	50
Lumbriciden (Regenwürmer)	100	500	30	200
Gastropoden (Schnecken)	50	1000	1	30
Araneen (Spinnen)	50	200	0,2	1
Isopoden (Asseln)	30	200	0,4	1,5
Diplopoden (Doppelfüßer)	100	500	4	10
Chilopoden (Hundertfüßer)	30	300	0,4	2
Coleopteren (Käfer)	100	600	1,5	20
Dipteren (Zweiflügler)	100	1000	1	15
übrige Insekten	150	15000	1	15
Vertebraten	0,01	0,1	0,1	10

Quelle: DUNGER 1983, verändert

Wichtiger als Abundanz und Biomasse ist aber die Funktion. SCHAEFER (1989) hat in einem Kalkbuchenwald die Konsumtion (Nahrungsaufnahme), Produktion (Bildung von Biomasse), Veratmung und Ausscheidung von verschiedenen Bodentiergruppen untersucht (Tab. 6). Die Regenwurmbiomasse liegt mit 9,8 g TS/m² (=ca. 50 g FM/m²) unter den Mittelwerten für Baden-Württemberg, ist aber viel höher als die Biomasse aller anderen Bodentiere. Es zeigt sich, dass die Regenwürmer die mit Abstand größte Nahrungsaufnahme aller Bodentiere haben. Allerdings wird davon relativ wenig in Biomasse umgesetzt und auch nicht besonders viel veratmet. Das allermeiste wird wieder ausgeschieden, hat aber durch die Passage im Regenwurmdarm eine deutliche Veränderung erfahren und ist dann eine wertvolle Nahrungsressource für die Mikroflora und -fauna.

Tab. 6: Bodentiere in einem Kalkbuchenwald bei Göttingen (bezogen 1 m² Oberfläche)

	saprophag	zoophag	phytophag	Artenzahl	Individuen	Biomasse [Trockenmasse]	Konsumtion	Produktion	Respiration	Egestion
					je m ²	mg/m ²	g C/m ²	g C/m ²	g C/m ²	g C/m ²
Mikrofauna										
Flagellaten (Geißeltierchen)	x			-	2,7x10 ⁹	54	2,4	0,6	0,5	1,3
Rhizopodien (Wurzelfüßer)	x			-	3,5 x10 ⁹	1476	70	17,3	14,9	37,8
Mesofauna										
Nematoden (Fadenwürmer)	x	x	x	65	7x10 ⁶	146	4,4	0,3	1,6	2,5
Gamasinen (Raubm.)		x		67	2600	45	0,3	0,1	0,1	<0,1
Cryptostig. (Hornm.)	x			>21	23000	180	0,7	0,2	0,1	0,4
Collembolen (Springschw.)	x			48	38000	15	3,6	0,4	0,5	2,7
Makrofauna										
Enchyträen	x			36	22000	600	16,1	1,3	2,6	12,2
Lumbriciden (Regenw.)	x			10	235	9800	209,2	4,1	6,3	198,8
Gastropoden (Schnecken)	x	x	x	30	120	430	2,0	0,9	0,5	0,6
Araneen (Spinnen)		x		102	140	47	0,2	0,1	0,1	<0,1
Isopoden (Asseln)	x			6	286	93	1,4	0,1	0,3	1
Diplopoden (Doppelfüßer)	x			6	55	618	4,3	0,7	0,2	3,4
Chilopoden (Hundertfüßer)		x		10	187	265	1,7	0,4	1,0	0,3
Carabiden (Laufkäfer)		x	x	24	5	144	0,4	0,2	0,1	0,1
Dipteren (Larven)	x	x		>245	2706	119	15,9	0,1	0,3	15,5

Quelle: SCHAEFER 1989, verändert

2.5. Vergleich von Regenwürmern mit dem Vorkommen von anderen Organismen in Baden-Württemberg

Vergleicht man die Biomassen der Regenwürmer mit denen der wichtigsten landwirtschaftlichen Nutztiere (Tab. 7) so zeigt sich, dass die Biomasse der Regenwürmer im Mittel deutlich über denen von Rindern und Schweinen liegt. Auch die Biomasse der Menschen ist deutlich geringer.

Tab. 7: Vergleich der Biomassen von Menschen, Rindern, Schweinen und Regenwürmern in Baden-Württemberg [in t]

	Menschen	Rinder	Schweine	Regenwürmer
Abundanz	10 750 000	1 050 000	2 120 000	8 000 000 000 000
Biomasse* [t]	752 500	525 000	106 000	2 350 000

* hochgerechnet (Menschen 70kg, Rinder 500 kg, Schweine: 50 kg
Quelle: Statistisches Landesamt Baden-Württemberg 2008a

2.6. Fazit

Die Regenwurmfauna Baden-Württembergs weist im Mittel hohe Abundanzen und Biomassen auf. Insgesamt gibt es mindestens 27 Arten in Baden-Württemberg, an einem Standort kommen im Mittel aber nur 4,2 Arten vor. Da diese auch noch verschiedene Funktionen haben ist die Redundanz der von Regenwürmern übernommenen Funktionen gering. Schon der Ausfall einer anezischen Art wird in der Regel den Standort verändern.

Innerhalb der verschiedenen naturräumlichen Einheiten Baden-Württembergs gibt es deutliche Unterschiede. Daher ist eine regional differenzierte Betrachtung notwendig.

Regenwürmer sind in Baden-Württemberg die Tiere mit der höchsten Biomasse. Keine andere Bodentiergruppe weist eine nur annähernd ähnlich große Biomasse auf. Auch die wichtigsten landwirtschaftlichen Nutztiere weisen eine geringere Biomasse auf. Dies ist ein Grund für die große Bedeutung der Regenwürmer.

3. Bedeutung der Regenwürmer für Bodenstruktur und Nährstoffhaushalt

3.1. Wirkungen der Regenwürmer auf das Bodengefüge

Regenwürmer können das Gefüge des Bodens vor allem verändern durch:

- Einmischung organischer Substanz in den Boden
- Feinvermischung von organischer und mineralischer Substanz im Darm
- Losungsablage
- Anlage von Röhren

3.1.1. Einmischung von organischer Substanz in den Boden

Regenwürmer fressen in der Regel keine lebenden Pflanzenteile oder frisch gefallene Streu sondern ernähren sich von vorzersetzer organischer Substanz wobei die darin lebenden Mikroorganismen vermutlich einen großen Teil der Nahrung ausmachen. Im Boden sind die Bedingungen für die mikrobielle Vorzersetzung aufgrund höherer Feuchte und geringerer Temperaturschwankungen meist günstiger als an der Bodenoberfläche. Manche Regenwurmarten sammeln daher Streu an der Bodenoberfläche, ziehen sie in den Boden (Bild 11; NIELSEN & HOLE 1964) und fressen sie nach einer mikrobiellen Vorzersetzung. Dadurch werden erhebliche Mengen organischer Substanz in den Boden eingemischt. Von SATCHELL (1967) wurde berechnet, dass eine *L. terrestris* - Population die gesamte Laubmasse eines Jahrganges einmischen kann. Zu ähnlichen Ergebnissen kam SCHÄFER (1989) bei der Untersuchung eines Kalkbuchenwaldes bei Göttingen. Die Einmischung erfolgt vor allem durch anezische Arten (wobei es auch anezische Arten wie *A. longa* gibt, die keine Streu in den Boden ziehen). An der Streueinarbeitung sind manchmal auch epigäische Arten wie *L. rubellus* und in geringem Umfang auch endogäische Arten beteiligt. An den meisten Standorten wird die für das Ökosystem sehr wichtige Funktion "Einmischen von organischer Substanz" aber nur von einer Art durchgeführt, meist handelt es sich dabei um *L. terrestris*. Diese wichtige Funktion ist daher nicht redundant besetzt, der Ausfall dieser Art führt dann zu einem längeren Verbleib der Streu an der Bodenoberfläche. Im Wald ändert sich dann die Humusform (meist vom L-Mull zu F-Mull). Bei Abwesenheit von Regenwürmern kann es sogar im Grünland zur Bildung von Streumatten an der Bodenoberfläche kommen (STOCKDILL 1982, MARINISSEN & BOK 1988).

3.1.2. Feinvermischung von organischer und mineralischer Substanz im Darm

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 9 u. 12; 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 Regenwurmlösungen 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.

3.1.3. Losungsablage

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 13 u. 14) oder im Mineralboden (Bild 10) 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 legen die Losungen in der Regel an der Bodenoberfläche ab oder kleiden ihre Wohnröhre damit aus. Die Losungen von kleinen epigäischen Arten findet man in der Regel in den obersten cm der Humusaufgabe, größere Arten wie *L. rubellus* legen auch Losungen an der Bodenoberfläche ab. Die Losungen von manchen Arten haben eine charakteristische Form (sehr typisch sind z.B. die Losungen von *A. longa*), anhand der Losung kann man daher an geeigneten Standorten das Vorkommen einer Art oder einer ökologischen Gruppe kartieren.

Die **Losungsmenge** an der Bodenoberfläche kann durch Absammeln relativ einfach und ohne große Störung ermittelt werden. Sie liegt im Jahr in der Regel bei mehreren kg/m² (BOUCHE 1982, SHARPLEY et al. 1979, GLASSTETTER 1991; ausgenommen davon sind regenwurmarme Standorte). 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 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 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 prägen. Dabei hat die Haltbarkeit der Losungen einen wesentlichen Einfluss auf das Ergebnis. Die Untersuchung von 32 Waldstandorten in Baden-Württemberg zeigte, dass der Oberboden (0-8 cm) an praktisch allen Waldstandorten mit einem pH-Wert von ca. >4,2 (CaCl₂) vorwiegend aus Regenwurmlösungen besteht (Abb. 3). An sauren Waldstandorten war der Einfluss der Regenwürmer geringer, der Anteil von Losungen anderer Tiere wird relativ wichtiger (Enchyträen, Dipteren), absolut ist aber dann die Bioturbation geringer. Die Ergebnisse lassen sich vermutlich mit Einschränkungen auch auf Grünlandstandorte

übertragen, in Äckern werden die biogenen Bodenstrukturen im Oberboden +/- regelmäßig durch Bodenbearbeitung überprägt.

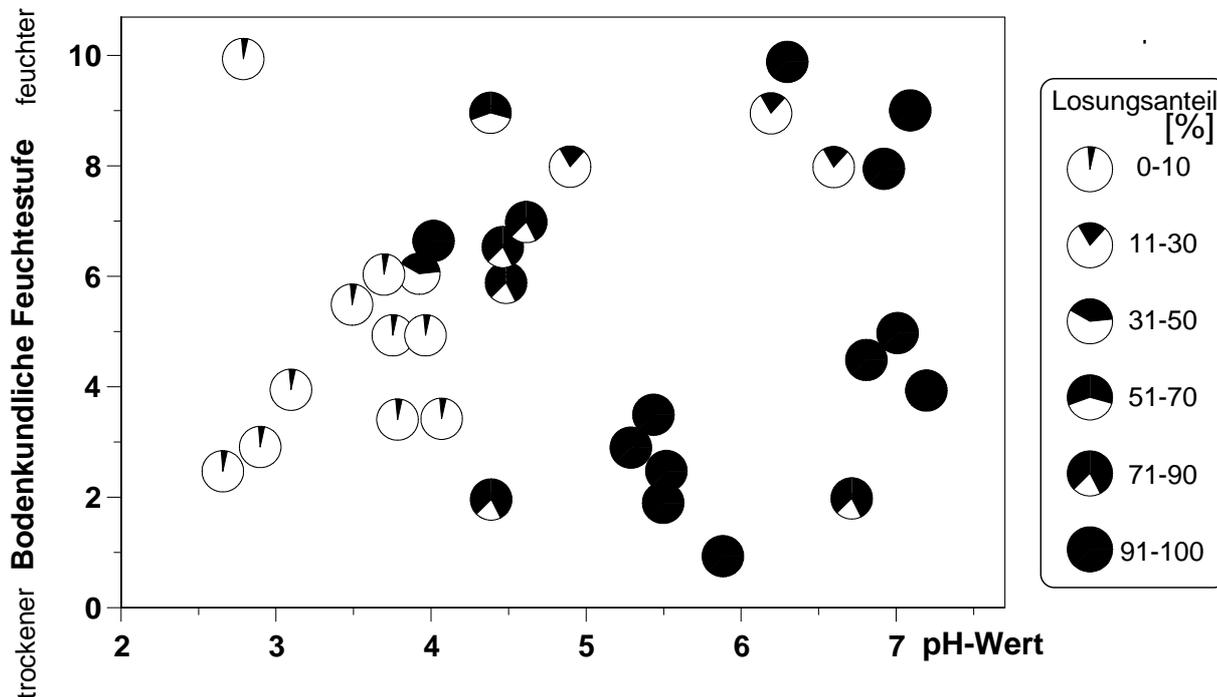


Abb. 3: Anteil der Regenwurmlosungen an der Bodenfestschubstanz (32 Waldstandorte in Baden-Württemberg, Oberboden 0-8 cm Tiefe, Quelle: EHRMANN unveröffentlicht)

3.1.3.1. Anlage von Röhren

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 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 von den Regenwürmern angelegten Röhren sind von der Art bzw. der ökologischen Gruppe abhängig:

Manche **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 (LAMPARSKI et al. 1987, NIELSEN & HOLE 1964). Im Unterboden können sie sehr lange erhalten bleiben. Regenwurmröhren finden sich z.B. in Baden-Württemberg auch noch in Lössböden aus Zwischeneiszeiten.

Endogäische Regenwürmer bildeten in Laborversuchen ein umfangreiches Röhrensystem (SCHRADER 1993). Im Freiland findet man Röhren von endogäischen Regenwürmern meistens im Oberboden, manchmal haben diese eine Öffnung an der Bodenoberfläche. Bei dichtem Boden legen endogäische Regenwürmer kein Röhrensystem an, sondern sie

fressen den Boden am Vorderende und füllen am Hinterende die Röhre sofort wieder zu (eigene Beobachtungen). Die Anzahl der Röhren kann bei endogäischen Regenwürmern sehr hoch sein, da sie im Gegensatz zu anezischen Arten die Röhren meist nur kurze Zeit bewohnen.

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.

Bedeutung der Regenwurmröhren

Die Regenwurmröhren haben nicht nur für die Tiere selbst, sondern auch für den Boden wesentliche Funktionen:

- Sie stellen Wege für Luft und Wasser und darin gelöste oder suspendierte Stoffe dar. Sie können daher die Infiltration erhöhen (Bild 15; 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).
- 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 16). Die humusreiche Wandtapete der Röhren von *L. terrestris* ist für Pflanzen eine beträchtliche und leicht erschließbare Nährstoffquelle (GRAFF 1971).

Betrachtet man einen Bodenquerschnitt im Unterboden von Äckern so zeigt es sich, dass in Parabraunerden und ähnlichen Böden die Regenwurmröhren in der Regel die einzigen großen kontinuierlichen Hohlräume sind. Ein Verschwinden dieser Röhren würde die Bodenfruchtbarkeit der wichtigsten Ackerstandorte Baden-Württembergs deutlich verschlechtern, da dann sowohl die Erosion zunähme als auch die in Trockenphasen besonders wichtige Tiefendurchwurzelung abnähme.

Eine Untersuchung der Röhren von anezischen 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 sie in nassen Böden (Moor) und tonärmeren Böden (Sand, Schluff) nicht vorkamen (Abb. 4). Die meisten Röhren wurden in Unterböden von Löss-Parabraunerden gefunden (schluffiger Lehm, 400 Röhren je m²). Nur ca. 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 an Röhren im Oberboden. Diese betrug immer nur ein 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 an neuen Röhren hin. Im Oberboden werden die Röhren mindestens 1x im Jahr durch Bodenbearbeitung zerstört, im Unterboden sind sie

dauerhafter. Dies gilt besonders für Löss-Parabraunerden, in tonreichen Böden werden sie wohl durch Quellen und Schrumpfen häufiger zerstört.

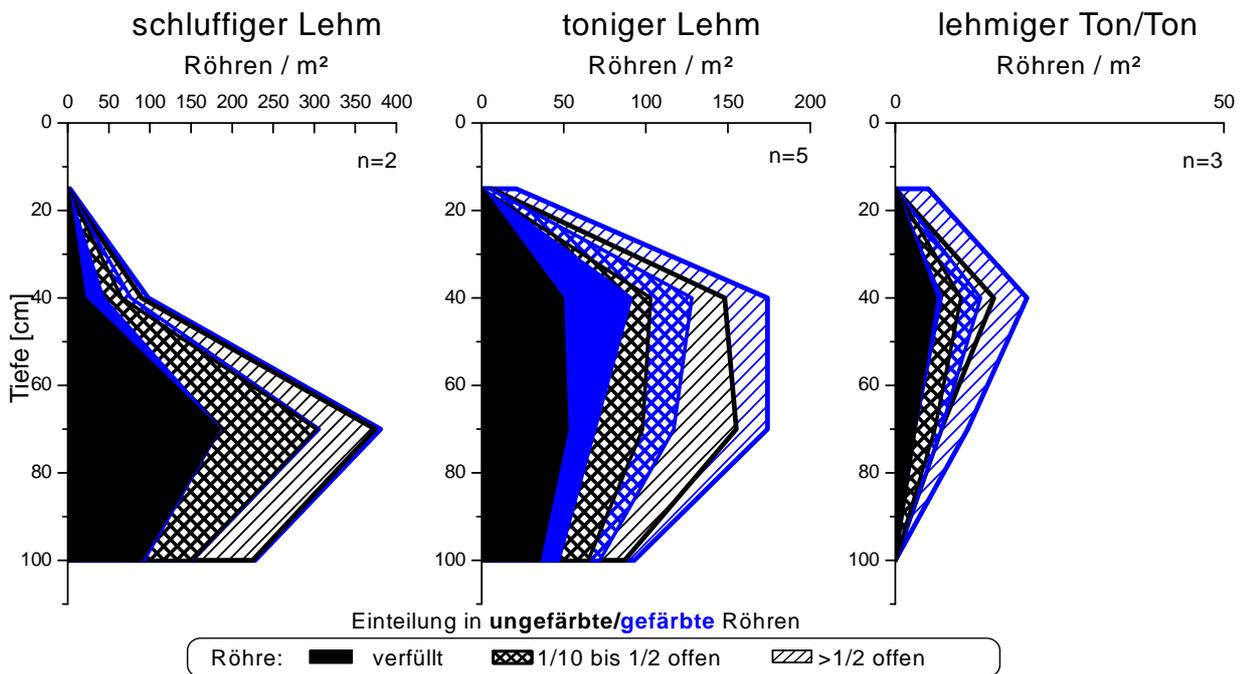


Abb. 4: Tiefenfunktion der Anzahl von Regenwurmröhren in Äckern Baden-Württembergs bei verschiedenen Bodenarten. Gezählt wurden nur Regenwurmröhren ≥ 7 mm Durchmesser. Die Röhren sind in drei Gruppen (nach dem Grad der Verfüllung) eingeteilt, in jeder Gruppe wird nochmals zwischen gefärbten (=am schnellen Fluss beteiligt) und ungefärbten Röhren unterschieden. An sandigen und sehr schluffigen Standorten fehlten Röhren tiefgrabender Regenwürmer (daher nicht dargestellt). Flachgründige Böden wurden berücksichtigt. Quelle: EHRMANN & SCHWARZ 2002.

Tab. 8: Leistungen der ökologischen Gruppen im Vergleich

	epigäische kleine	epigäische große	endogäische	anezische
Einmischung von org. Substanz in den Boden	+	++	+	+++
Feinvermischung von organischer und mineralischer Substanz	+	+	+++	++
Lockern durch Losungsablage an der Bodenoberfläche	+	+	+	++
Anlage von Röhren im Oberboden	+	++	+++	++
Anlage von tiefreichenden Röhren	0	-/+	-/+	+++
Nahrungsquelle für andere Tiere	++	+++	++	+++

Legende: 0 = nicht, + = etwas, ++ viel, +++ sehr viel

3.1.4. Leistungen der verschiedenen ökologischen Gruppen im Vergleich

Die Leistungen der verschiedenen ökologischen Gruppen sind in Tab. 8 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.

3.1.5. Vergleich mit anderen Tieren

Eine Reihe von Tieren hat Einfluss auf die Bodenstruktur. Neben Regenwürmern können in Mitteleuropa vor allem Kleinsäuger (Hamster, Maulwürfe, Mäuse) und staatenbildende Insekten (Ameisen) erhebliche Mengen Boden umlagern. Regenwürmer haben aber eine besondere Stellung, weil sie die Bodenstruktur über einen sehr großen Skalenbereich beeinflussen (Meter - μm ; Abb. 5). Im Gegensatz z. B. zu den Kleinsäufern transportieren sie nicht nur den Boden sondern ingestieren ihn auch. Dabei wird der Boden auch in seiner Mikrostruktur +/- vollständig aufgelöst und neu zusammengesetzt. Außerdem legt keine andere Tierart so viele tiefreichende Röhren an.

Abgesehen von sehr trockenen, sehr nassen oder einigen sandigen Böden dürften daher in Baden-Württemberg Regenwürmer die Tiergruppe mit dem größten Einfluss auf die Bodenstruktur sein.

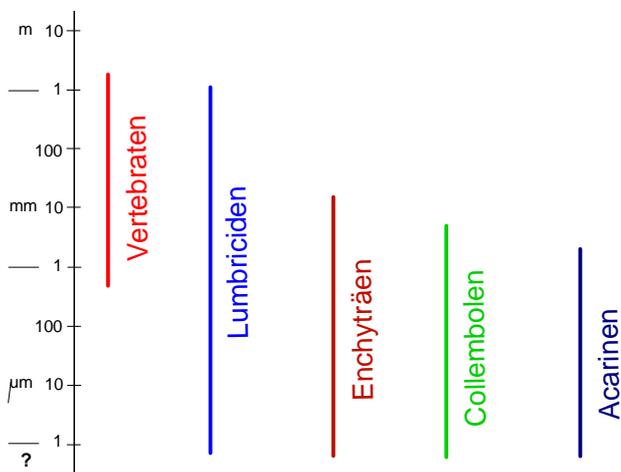
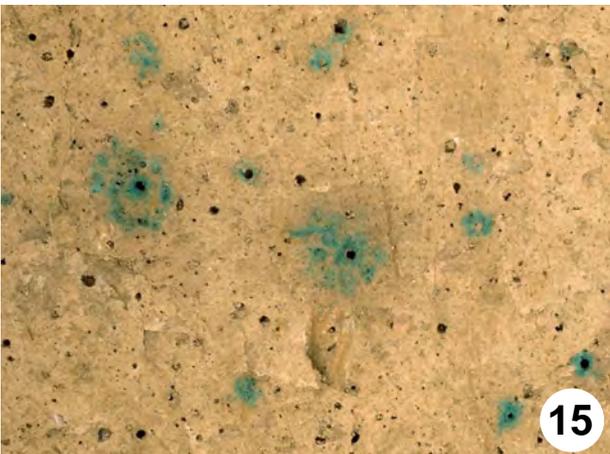
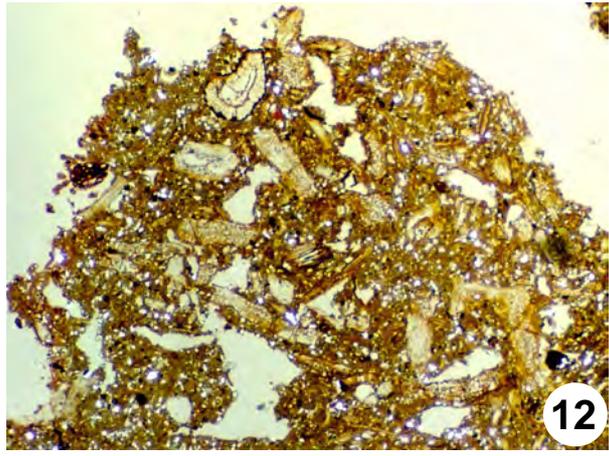
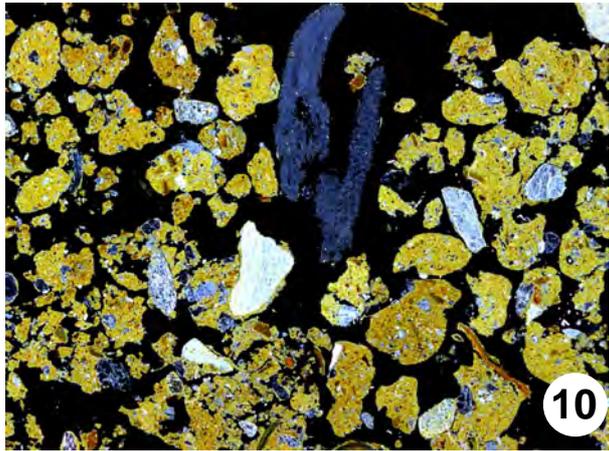
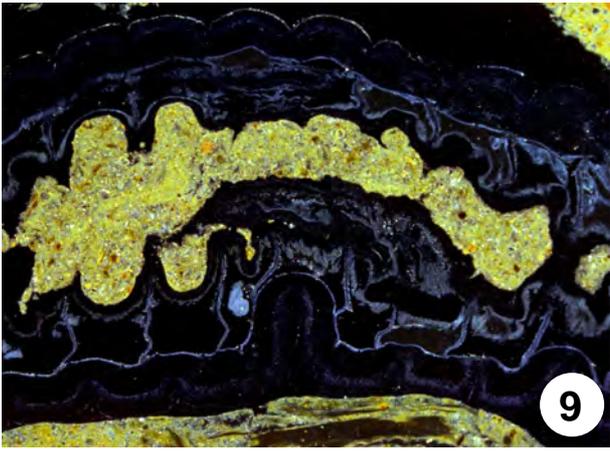


Abb. 5: Skalenbereiche – Einfluss der Bodentiere auf die Bodenstruktur



Bildtafel 2: Beispiele zu Funktionen von Regenwürmern

Bild 9: Schnitt durch einen Regenwurm

Dieser Längsschnitt durch einen Regenwurm (Bildbreite 5 mm) bei Durchlicht-Dunkelfeld-Beleuchtung (Hohlräume sind dabei schwarz) zeigt in der Mitte des Regenwurmes den Darminhalt. Im Darm ist der Boden dispergiert, d.h. die ursprüngliche Bodenstruktur ist aufgelöst, im Regenwurmdarm findet eine Neuvermischung von organischer und mineralischer Substanz statt.

Bild 10: Regenwurmlosungen im Oberboden

Dieser Vertikalschnitt (Dünnschliff: Durchlicht-Dunkelfeld-Beleuchtung, Bildbreite 14 mm) aus dem Oberboden einer Pararendzina zeigt zahlreiche Aggregate von ca. 2 - 3 mm Größe. Die meisten davon haben verrundete Oberflächen. Dies ist in dieser Größenklasse typisch für Regenwurmlosungen. Unten links sind die Regenwurmlosungen durch den Fraß anderer Bodentiere verändert. Oben, ungefähr in der Mitte des Bildes liegen zwei Wurzeln.

Bild 11: Zusammengezogene Blätter

Vom nahen Wald wurden Laubblätter auf einen Acker geweht. Ein anezischer Regenwurm hat die Blätter in der Umgebung seiner Röhre gesammelt und zieht sie nach und nach in seine Röhre. Dort wird durch das günstigere Mikroklima die mikrobielle Vorzersetzung gefördert. Die vorzersetzten Blätter werden vom Regenwurm verzehrt und mit dem gleichzeitig aufgenommenen Mineralboden intensiv vermischt.

Bild 12: Regenwurmlosung im Detail

Dünnschliff von der Losung eines großen anezischen Regenwurms (Bildbreite 4 mm). Neben zahlreichen Pflanzenresten (mit Innenstruktur) enthält die Losung auch viel mineralisches Material (zahlreiche helle Quarzkörner sind zu sehen). Mineralisches Material und Pflanzenreste sind gleichmäßig in der Losung verteilt, sie wurden im Regenwurmdarm intensiv vermischt. Dadurch wird die Bildung von Ton-Humus-Komplexen gefördert.

Bild 13: Aporetodea longa bei Losungsablage

Der Regenwurm kommt dazu mit dem Hinterende aus dem Boden. *A. longa* legt häufig seine Losung an der gleichen Stelle ab. Dadurch entstehen charakteristische Losungshäufchen, anhand deren auch sein Vorkommen erfaßt werden kann. Durch die Losungsablage an der Oberfläche wird der Boden in erheblichem Umfang gelockert.

Bild 14: Losungen an der Bodenoberfläche

Auf einem stark betretenen Rasen haben Regenwürmer nach der Winterruhe ihr Röhrensystem erneuert. Da der verdichtete Boden keinen Raum für die Losungsablage bot, haben sie die Losungen auf die Bodenoberfläche gelegt. Die jährliche Losungsablage an der Bodenoberfläche kann beträchtliche Ausmaße annehmen (z.T. über 5 kg m^{-2}).

Bild 15: Regenwurmröhren im Unterboden

Bild 15 ist eine Aufsicht auf den Boden in 70 cm Tiefe (Bildbreite 50 cm). Das Bild zeigt zahlreiche Regenwurmröhren verschiedenen Durchmessers. Vor dem Aufgraben wurde eine einem Starkregen entsprechende Menge (30 l m^{-2}) blaugrün angefärbten Wassers auf die Bodenoberfläche ausgebracht. Die Verteilung der Farbe um die Röhren zeigt, daß der Wassertransport in dieser Tiefe fast nur in Regenwurmröhren stattgefunden hat.

Bild 16: Wurzeln in Regenwurmröhren

Das Bild zeigt drei Regenwurmröhren in ca. 70 cm Tiefe (vertikaler Schnitt, Bildbreite 9 cm). Die Regenwurmröhren heben sich aufgrund ihrer Form und ihrer dunklen Wandauskleidung (Humustapete) vom umgebenden Boden ab. In alle drei Röhren sind Wurzeln hineingewachsen, wenige in die rechte Röhre und sehr viele in die mittlere. Vertikale Regenwurmröhren erleichtern Wurzeln den Weg in den Unterboden, gleichzeitig stellt die Humustapete eine Nährstoffquelle dar.

3.2. Nährstoffhaushalt

An vielen Standorten arbeiten Regenwürmer die jährlich anfallende Streu praktisch vollständig in den Boden ein (BIERI & CUENDET 1989). Regenwürmer nutzen aber "nur" ca. 5 % der Energie aus der Nahrung bei einer Darmpassage (SCHÄFER 1989). Die Stoffumsätze durch Mikroorganismen sind höher. Die Regenwürmer steuern aber die Richtung des Streuabbaus als "ecosystem-engineers".

Kurzfristig sorgt die Einmischung der organischen Substanz in den Boden für eine Beschleunigung des Streuabbaus. Am deutlichsten sieht man dies an den Standorten mit der am schwersten abbaubaren Streu, nämlich im Wald. Standorte mit geringer Regenwurmbiomasse weisen eine langsame Streuzersetzung und damit auch eine ungünstige Humusform auf (Abb. 6, EHRMANN et al. 2002). Die Beschleunigung des Streuabbaus ist in der Regel positiv – die Nährstoffe stehen der Vegetation früher wieder zur Verfügung. Davon ausgenommen sind z.B. Äckern die brach liegen und bei denen die Nährstoffe ausgewaschen werden können.

Langfristig wird durch die Vermischung von organischer und mineralischer Substanz im Regenwurmdarm ein Teil der organischen Substanz stabilisiert und vor weiterem mikrobiellen Abbau geschützt (MARTIN 1991) – so erhöht sich allmählich der Humusgehalt.

Der Regenwurmkot ist reicher an Nährstoffen als der umgebende Boden (GRAFF 1971).

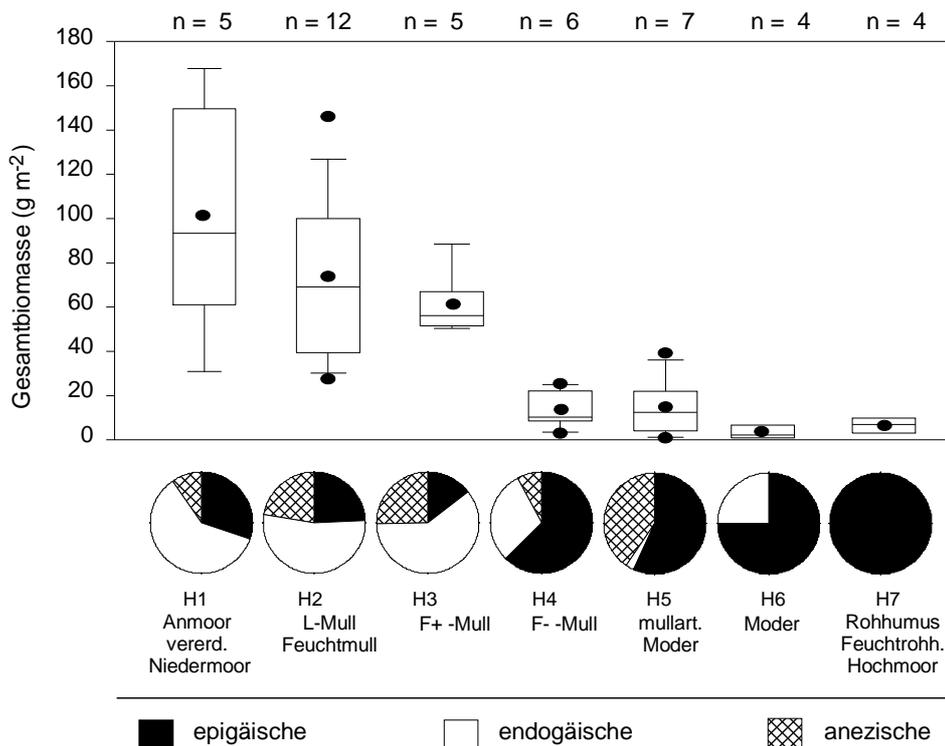


Abb. 6: Regenwurmbiomassen und Humusformen an 43 Waldstandorten in Baden-Württemberg (oben: Regenwurmbiomasse, unten: mittlere Biomassedomianz der ökologischen Gruppen). Der F-Mull wurde aufgrund von Mächtigkeit und Ausprägung des Ah-Horizonts in eine günstige (F+ = krümeliger Ah >10 cm) und ungünstige Form (F-) unterteilt. Quelle: EHRMANN et al. 2002

3.3. Phytosanitäre Wirkungen

Durch die schnelle Streueinarbeitung übernehmen die Regenwürmer eine wichtige phytosanitäre Funktion. Niklas (1980) stellte fest, dass infolge der zügigen Einarbeitung der Blätter von Obstbäumen durch *Lumbricus terrestris* ein hoher Anteil an phytopathogener Pilze vernichtet wird. STEPHENS et al. (1997) fanden eine deutliche Reduktion des Befalls mit *Rhizoctonia solani* bei Weidepflanzen in Anwesenheit von Regenwürmern.

3.4. Wie groß ist der positive Effekt der Regenwürmer?

Regenwürmer gelten grundsätzlich als sehr nützliche Tiere. Davon gibt es nur wenige Ausnahmen (siehe 3.7.1). Die Folgen eines Ausfalls der Regenwürmer lassen sich allerdings 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 Regenwürmer 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 ja schon eine von Regenwürmern geschaffene Struktur existiert, die auch - mindestens im Unterboden – über Jahre bis Jahrzehnte noch positive Wirkungen hat.

- BAKER et al. (2003) untersuchten in Australien in +/- ungestörten Freilandkäfigen den Einfluss zweier Regenwurmartenspezies auf das Wachstum und den Ertrag von Hafer und Lupinen. Bei Anwesenheit von *A. trapezoides* war der Ertrag von Hafer deutlich höher, *A. rosea* führte hingegen zu keiner Ertragsverbesserung. Bei der N fixierenden 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 (dieses Insektizid reduzierte neben vielen Pflanzenschädlingen auch Regenwürmer) 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. Anmerkung des Autors: vermutlich beruht der höhere Ertrag ohne Regenwürmer in den ersten 11 Jahren auf einen 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 (dies gelang nur teilweise). 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. (1983) in Flächen auf denen Regenwürmer angesiedelt wurden deutlich bessere Bodeneigenschaften und einen um ca. 10% höheren Ertrag der Weide fest.
- In regenwurmfreien neuseeländischen Weiden konnte durch das Einbringen von Regenwürmern ein Ertragsanstieg um 20 % erreicht werden (STOCKDILL 1982)
- Aus eigener Anschauung kennt der Autor benachbarte Flächen 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 mind. 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".

3.5. Regenwürmer als Nahrungsquelle für andere Tiere

Regenwürmer weisen die größte Biomasse aller tierischen Organismen in Baden-Württemberg auf (siehe 2.4 u 2.5). Die stoffliche Zusammensetzung eines Regenwurms ist günstig als Nahrungsquelle: der Regenwurm ist sehr eiweißreich und weist kein Skelett auf. Störend dürfte höchstens der mineralische Darminhalt sein (Abb. 7).

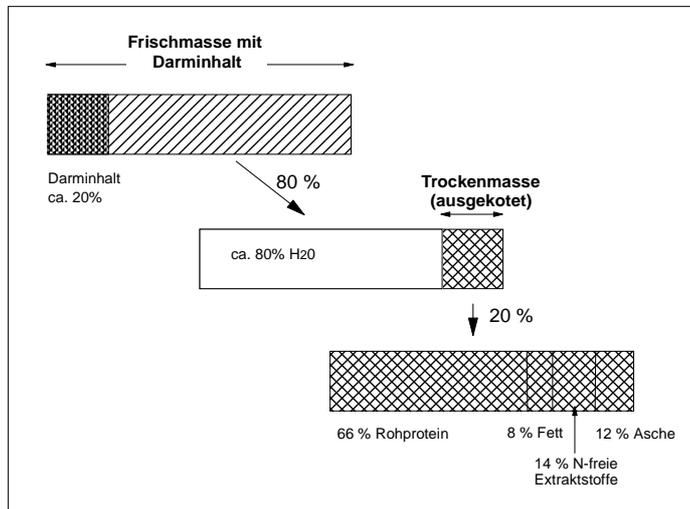


Abb. 7: stoffliche Zusammensetzung eines Regenwurms
(Quellen: SCHULZ & GRAFF 1977, MARTIN 1986)

Daher wundert es nicht, dass der Regenwurm bei einer Reihe von Tieren auf dem "Speisezettel" steht (die folgende Liste 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.

- **Plattwurm** (*Arthiopostia triangulata*): Der aus Neuseeland auf die Britischen Inseln und Irland eingeschleppte Plattwurm hat sich zu einer echten Bedrohung der dortigen Regenwurmfauna und der angrenzenden Gebiete entwickelt. Er kann Regenwürmer stark dezimieren und lokal sogar ausrotten (MATHER & CHRISTENSEN, 1993; BLACKSHAW 1995). Aufgrund seiner klimatischen Ansprüche könnte er nach einer Verschleppung auch im atlantisch getönten Nordwestdeutschland leben. Der Klimawandel wirkt sich ungünstig auf den Plattwurm aus.
- **Chilopoden**: sowohl die Stein- als auch die Erdläufer fressen Regenwürmer
- **Schnecken**
- **Insekten**: vor allem Käfer(larven), Ameisen
- **Amphibien & Reptilien**

- **Vögel:** z.B. Amsel, Krähen, Bussard, Möwen, Reiher, Kiebitze, Hühner fressen Regenwürmer. Die große Bedeutung der Regenwürmer als Nahrungsquelle wurde z.B. für die seltene Waldschnepfe untersucht (DURIEZ et al. 2005).
- **Säugetiere:** Spitzmäuse, Maulwurf, Fuchs, Dachs, Igel, Wildschwein

Durch die Fraßfeinde ist der Regenwurm in der Regel nicht gefährdet (JUDAS 1989) - mit Ausnahme des Plattwurmes. Ein Ausfall der Regenwürmer würde aber umgekehrt einigen Spezialisten Probleme bereiten. Viele andere Tiere hätten keine wichtige zusätzliche Nahrungsquelle mehr. So sind Regenwürmer praktisch die ausschließliche Nahrung von Kiebitzen im Frühjahr auf dem Durchzug und junge unerfahrene Bussard fangen sehr oft Regenwürmer (eigene langjährige Beobachtungen). Ein Ausfall dieser großen Nahrungsressource hätte daher erhebliche Auswirkungen im Tierreich.



Bild 17: Kiebitz fängt Regenwurm. Wenn der Boden zum Ende des Winters aufgetaut und etwas erwärmt aber noch nicht abgetrocknet ist sind in Nordostwürttemberg regelmäßig Kiebitze auf dem Durchzug zu beobachten. Zu dieser Zeit sind viele Regenwürmer nahe der Bodenoberfläche aktiv. Die Kiebitze ernähren sich auf dem Durchzug fast ausschließlich von Regenwürmern. Sie sind sehr geschickte Regenwurmfänger. Ein Tier fängt in einer Stunde durchschnittlich mindestens 5 große Regenwürmer (meist *Lumbricus terrestris*).

3.6. Substituierbarkeit der Leistungen der Regenwürmer

In diesem Abschnitt soll betrachtet werden ob die Leistungen der Regenwürmer von anderen Organismen oder von Maschinen substituiert werden können.

Tab. 9: Substituierbarkeit der Leistungen der Regenwürmer

Leistungen	substituierbar durch		Folge
	andere Tiere	Maschinen	
Einmischung von org. Substanz in den Boden	sehr eingeschränkt	im Acker durch Maschinen	Änderung der Humusform im Wald, Streumatte im Grünland, aber kaum Auswirkungen im Acker
Feinvermischung von organischer und mineralischer Substanz	sehr bedingt ersetzbar durch Enchyträen (auf kleinerer Skala)	mechanisch nicht sinnvoll möglich	Abnahme des Humusgehaltes
Lockern durch Losungsablage an der Bodenoberfläche	sehr bedingt durch andere Tiere	maschinelle Lockerung (Acker)	Bodenverdichtung
Anlage von Röhren im Oberboden	sehr eingeschränkt	im Acker kann durch eine maschinelle Lockerung vorübergehend ähnliches erreicht werden	Abnahme von Durchlüftung und Infiltration, Zunahme Erosion
Anlage von tiefreichenden Röhren	nicht	maschinell nicht möglich	Infiltration, Durchlüftung und Durchwurzelung verringert, vermehrte Erosion, Mindererträge
Nahrungsquelle für andere Tiere	von einem Ausfall der Regenwürmer profitieren vor allem kleinere Organismen, die als Nahrungsquelle für Vögel und Säuger uninteressant sind	/	Verminderung / Verschwinden einiger Tierarten, Änderung von Zugrouten

Es zeigt sich (Tab. 9) dass einige wichtige Leistungen der Regenwürmer nicht von landwirtschaftlichen Maschinen oder von anderen Tieren übernommen werden können. Ein Ausfall der Regenwürmer hätte daher erhebliche Auswirkungen auf Nährstoffhaushalt/Trophie von Ökosystemen.

3.7. Schäden bei einem Ausfall/Reduktion der Regenwürmer

Belastbare Daten über die Langzeitwirkungen eines Ausfalls der Regenwürmer fehlen. Sie sind auch schwierig zu erheben, weil in Mitteleuropa Regenwürmer derzeit überall leben können und daher ein Ausschluß der Regenwürmer immer auch zu künstlichen Systemen führt. Die wesentlichen Schäden wären:

- eine Verschlechterung der Bodenstruktur.
- Veränderung der Nährstoffkreisläufe (vor allem im Wald)
- Nahrungsmangel für viele Tierarten

Vor allem die Verschlechterung der Bodenstruktur hätte weitreichende Folgen:

- Zunahme der Erosion
- vermehrte Trocken- und Nässeschäden
- (etwas) höhere Pegel bei Überschwemmungen aufgrund verminderter Infiltration (HARIA, 1995)
- erhöhte Windwurfgefahr im Wald

Die verschiedenen Böden Baden-Württembergs wären nicht in gleichem Ausmaß betroffen. In reinen Sandböden leben relativ wenige Regenwürmer und sie haben auch kaum einen Einfluss auf die Unterbodenstruktur, daher wären dort die Auswirkungen gering. In tonigen Böden erfolgt durch Quellen und Schrumpfen auch eine abiotische Gefügeänderung. Auch in flachgründigen Muschelkalkrendzinen sind RW zwar förderlich, aber der Boden wird abiotisch auch etwas gelockert und kann im Acker nötigenfalls vollständig bearbeitet werden. Betroffen wären vor allem die mittleren Böden und dabei besonders die Lössstandorte, weil diese besonders verdichtungsanfällig sind - dies sind aber die produktivsten Böden Baden-Württembergs (Tab. 11).

Besonderes ungünstig wirkt sich eine schlechte Bodenstruktur in niederschlagsreichen Wintern (Sauerstoffmangel im Wurzelbereich) und in trockenen Sommern aus (Wassermangel aufgrund zu geringer Tiefendurchwurzelung). In trockenen Wintern und feuchten Sommern wird die Ertragsdepression hingegen viel geringer oder nicht feststellbar sein. Die im Zuge des Klimawandels prognostizierten nasseren Wintermonate und trockeneren Sommermonate stellen daher besonders große Anforderungen an die Bodenstruktur.

Ein Ausfall der Regenwürmer führt mit hoher Wahrscheinlichkeit zu Mindererträgen in der Land- und Forstwirtschaft. Im Folgenden soll eine ungefähre Hochrechnung die Größenordnung von Schäden bei einem Ausfall der Regenwürmer für die Landwirtschaft in Baden-Württemberg aufzeigen. Gerechnet wurde mit einer durchschnittlichen Ertragsreduktion von 3 %. Diese 3 % sind vermutlich eher vorsichtig geschätzt. Aus Topfversuchen ermittelt man Effekte die deutlich größer sind.

Tab. 10: Hochrechnung über mögliche jährliche Schäden in der Landwirtschaft bei einem Ausfall der Regenwürmer

	Ackerfläche	Grünlandfläche
Fläche in ha*	840000	551000
Bruttoertrag in € (geschätzt)	1500	750
Schaden je ha bei 3 % Ertragseinbuße [€]	45	22,5
Zwischensumme [Mio €]	37,8	12,4
Gesamtsumme Acker + Grünland	ca. 50 Mio € pro Jahr	

* Quelle: Statistisches Landesamt 2008b

Der (unwahrscheinliche) vollständige Ausfall der Regenwürmer würde sehr hohe Schäden verursachen (Tab. 10). Aber auch eine langfristige Verminderung von Abundanz und Biomasse hätte noch deutlich negative Auswirkungen, da die Leistungen der Regenwürmer von der Größe der Population abhängen. Forschung in diesem Bereich ist sehr lohnend!

3.7.1. Positive Folgen eines Ausfalls der Regenwürmer

Da die Leistungen der Regenwürmer in aller Regel positiv sind, sind eigentlich nur negative Auswirkungen von einem Ausfall der Regenwürmer zu erwarten. Davon gibt es jedoch einige Ausnahmen:

- bei einem Ausfall der Regenwürmer würde die Bildung einer Streumatte andere Tiergruppen – vor allem Vertreter der Bodenmesofauna fördern
- in seltenen Fällen – vor allem an einigen Standorten im Schweizer Mittelland – tragen Regenwürmer durch ihre Losungen erheblich zur Futtermverschmutzung bei (DANIEL et al. 1996). In Baden-Württemberg könnte dies an Standorten mit einer großen Population von *Aporrectodea longa* bei einer Bodenbelastung (z.B. mit Schwermetallen) von Bedeutung sein.
- in landwirtschaftlich genutzten Flächen gibt es immer wieder Schäden durch Wildschweine die den Boden auf der Suche nach Regenwürmern durchwühlen
- auf Golfplätzen werden die Greens durch versch. Maßnahmen (Sanden, Pestizide) regenwurmfrei gehalten. Dieser Aufwand könnte entfallen.

3.8. Fazit

Die Bedeutung der Regenwürmer für Bodenstruktur, Nährstoffumsatz und als Nahrungsquelle für andere Tiere ist in Tab. 11 vereinfacht zusammengefasst. Die Regenwürmer sind besonders wichtig in den Schluff- und Lehmböden, dies sind auch in der Regel die produktivsten Standorte Baden-Württembergs. Bei Sandböden ist die Bedeutung geringer.

Die Leistungen der Regenwürmer sind nur in geringem Umfang durch Maschinen oder andere Tiere substituierbar. Der ungünstige Fall - ein Ausfall der Regenwürmer - würde in den meisten Böden zu einer deutlichen Verschlechterung der Bodenstruktur führen, der Nährstoffumsatz würde sich vor allem im Wald ändern und aufgrund der großen Bedeutung der Regenwürmer als Nahrungsquelle hätte dies auch erhebliche Folgen im Tierreich.

Dies würde auch erhebliche Ertragseinbußen in der Landwirtschaft bedeuten. Dies lässt sich zwar nicht sicher quantifizieren ein jährlicher Schaden im zweistelligen Millionenbereich ist aber wahrscheinlich.

Tab. 11: Bedeutung der Regenwürmer differenziert nach Nutzung u. Bodenart

Bodenstruktur

	Sand	Schluff, Lehm	Ton
Wald	mäßig	groß*	sehr groß
Grünland	mäßig	groß	sehr groß
Acker	mäßig	groß	sehr groß

Nährstoffumsatz

	Sand	Schluff, Lehm	Ton
Wald	mäßig	groß*	sehr groß
Grünland	mäßig	mäßig	mäßig
Acker	mäßig	mäßig	mäßig

Nahrungsquelle

	Sand	Schluff, Lehm	Ton
Wald	mäßig	groß*	sehr groß
Grünland	mäßig	groß	sehr groß
Acker	mäßig	groß	sehr groß

Legende

mäßig	groß	sehr groß
mäßig	groß	sehr groß

* bei versauerten Wäldern (pH <4) sind die Auswirkungen geringer

4. Mögliche Auswirkungen der Klimaänderung auf Regenwürmer

4.1. Anstieg der Temperatur

Die Modellrechnungen zum Klimawandel (KLIWA 2006) prognostizieren für den Zeitraum 2021-2050 im Winter eine Temperaturerhöhung von ca. 2° C, im Sommer beträgt die Zunahme 1,4 °C. Die einheimischen Regenwürmer sind an die üblichen Bodentemperaturen relativ gut angepaßt. Die Optimaltemperaturen liegen daher vergleichsweise niedrig (Tab. 12). Lediglich der im Kompost lebende Wurm *Eisenia foetida* weist ein deutlich höheres Temperaturoptimum auf.

Tab. 12: Optimaltemperaturen einheimischer Regenwürmer [°C]

	GRAFF (1953)	BALTZER (1956)	SATCHELL (1967)	DAUGBJERG (1988)
<i>L. rubellus</i>	15-18	13,9 -15,0		
<i>A. caliginosa</i>	12	11,0-14,8		
<i>A. rosea</i>	12	12,4-15,8		
<i>A. chlorotica</i>	15	11,0-14,8		
<i>E. foetida</i>	25			
<i>O. cyaneum</i>	15			
<i>O. lacteum</i>		14,8-19,5		
<i>L. terrestris</i>			10,5	10

4.1.1. Auswirkungen der prognostizierten höheren Wintertemperaturen

Regenwürmer kommen auch nördlich des Polarkreises, sogar noch an der Grenze des Permafrostgebietes vor (für eine Aussage über den Permafrostbereich war das vorliegende Datenmaterial zu ungenau). Angepaßte Exemplare von *Dendrobaena octaedra* können ein Einfrieren bis unter minus 10° C überstehen, Kokons sind noch deutlich frostresistenter (BERMAN et al. 2001). Mitteleuropäische Arten hingegen überstehen Temperaturen von unter minus 3 °C nicht, Kokons sind aber ebenfalls frostresistenter (HOLMSTRUP & ZACHARIASSEN 1996). Die Strategie von mitteleuropäischen Arten ist daher das Vermeiden von Einfrieren.

In Hohenheim gefror der Boden im Zeitraum von 1992-2001 in 50 cm Tiefe nie, in 20 cm Tiefe wurden minimal minus 3,7 °C erreicht. Die frostbedingten Verluste in Baden-Württemberg dürften daher bisher eher gering gewesen sein, allenfalls epigäische Arten, vor allem in Hochlagen, dürften davon betroffen gewesen sein.

Allerdings können die Regenwürmer bei Temperaturen unter dem Gefrierpunkt nicht aktiv sein. Die prognostizierten milderen Winter werden den Aktivitätszeitraum im Winterhalbjahr vergrößern. Dadurch wird auch eine Verkürzung der Entwicklungszeit der Regenwürmer auftreten (Abb. 8). Dies wird sich insbesondere in den kühlen Gebieten des Landes (z.B. Hochschwarzwald) günstig auswirken. In den tieferen Lagen des Landes könnten sehr langfristig auch Arten aus wärmeren Klimaten einwandern. Allerdings werden die milderen Winter nicht dazu führen dass große Gebiete erstmalig von Regenwürmern besiedelt

werden, da sie derzeit schon in allen Höhenlagen Baden-Württembergs vorkommen können. Die prognostizierten milderen Winter sind also insgesamt günstig für Regenwürmer.

4.1.2. Auswirkungen der prognostizierten höheren Sommertemperaturen

Es gibt auch in deutlich wärmeren Klimaten Regenwürmer, so z.B. in Ägypten (EI DUWEINI & GHABBOUR (1965) und auch in den Tropen (MARTIN 1991, LAVELLE et al 1992). Regenwürmer können also prinzipiell mit Temperaturen zurechtkommen die deutlich über denen der für Mitteleuropa prognostizierten Klimaänderung liegen. Die Frage ist allerdings, wie die einheimischen Arten mit einer Temperaturerhöhung zurechtkommen.

Die Wirkung einer Temperaturerhöhung wurde für *Lumbricus terrestris* relativ gut untersucht. Diese Untersuchungen wurden nicht in Hinblick auf den Klimawandel durchgeführt, sondern hinsichtlich optimaler Haltungsbedingungen für die Regenwurmzucht (u.a. BERRY & JORDAN 2001). Eine Temperaturerhöhung führt zu einer Verkürzung der Entwicklungszeit bei einer gleichzeitig höheren Mortalität. Bei den Untersuchungen von BERRY & JORDAN (2001) in Iowa waren Temperaturen von 30°C nach 14 d fatal (25 °C nach 182 d), die optimale Temperatur für eine Massenproduktion lag bei 20 °C . DANIEL (1990) ermittelte in Haltungsversuchen in der Schweiz eine höhere Mortalität schon bei einer Temperatur von 17,5 °C (Abb. 8). *Lumbricus terrestris* baut in den meisten Böden eine Wohnröhre die nicht viel tiefer als 1 m in den Boden reicht. In 1 m Tiefe wurden im Zeitraum 1992 – 2001 in Hohenheim¹ eine maximale Temperatur von 19,5 °C erreicht, in 50 cm Tiefe wurde diese deutlich überschritten (22,4°C).

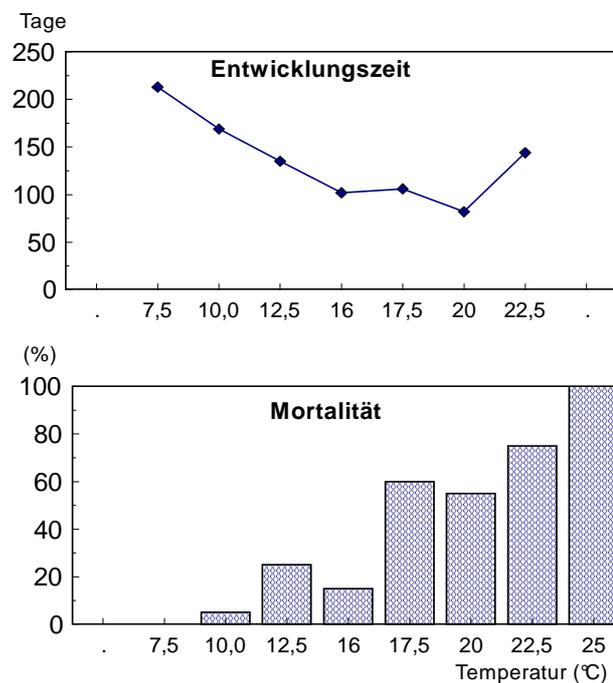


Abb. 8: Entwicklungszeit und Mortalität von *Lumbricus terrestris*
(Gefäßversuch; DANIEL 1990)

¹ Die Daten wurden freundlicherweise vom Institut für Physik und Meteorologie der Universität Hohenheim zur Verfügung gestellt

4.2. Änderung der Bodenfeuchte

Die Modellrechnungen zum Klimawandel (KLIWA 2006) prognostizieren überall eine deutliche Zunahme der Niederschläge im Winterhalbjahr und in den meisten Regionen geringere Niederschläge im Sommerhalbjahr. In Kombination mit einem Anstieg der Lufttemperatur bedeutet dies feuchtere Winter und meist trockenere Sommer.

4.2.1. Auswirkungen von Sommertrockenheit

Regenwürmer sind im Vergleich zu anderen Tieren relativ schlecht an trockene Bedingungen angepaßt. Bei einem Aufenthalt von mehreren Stunden an der (trockenen) Bodenoberfläche werden sie irreparabel geschädigt. Ursache ist der Körperbau: Regenwürmer haben keine speziellen Atmungsorgane sondern nehmen den Sauerstoff über die gesamte Körperoberfläche auf. Diese führt zu vergleichsweise hohen Flüssigkeitsverlusten.

Regenwürmer reagieren sehr deutlich auf unterschiedliche Feuchte. HEIMBERGER (1924) setzte in Laborversuchen Regenwürmer unterschiedlichen Luftfeuchten aus und es zeigte sich eine sehr schnelle Vermeidungsreaktion von Bedingungen mit niedrigen Luftfeuchten.

Bei Trockenheit können die Regenwürmer nicht aktiv sein (GERARD 1967). NORDSTRÖM & RUNDGREN (1974) fanden in Südschweden an trockenen Standorten weniger Regenwürmer als an feuchten. NORDSTRÖM (1975) berichtet von einer hohen Aktivität zwischen pF 2,0 und pF 3,2 und einer deutlichen Abnahme ab einem pF von >3,2-3,9 bei *A. caliginosa*, *A. longa* und *A. rosea*. In England fanden EVANS & GUILD (1948) im Laborversuch die höchste Kokonproduktion von *A. chlorotica* bei pF 2,3. Bei pF 3 unterblieb die Kokonproduktion fast ganz. Nach einer Trockenperiode (2 Wochen bei pF4,5) war die Kokonproduktion noch 2 Monate lang geringer (HOLMSTRUP 2001). In Gefäßversuchen mit Wahlmöglichkeit suchte *A. rosea* ab eine pF von 3,4 feuchteren Boden auf (DOUBE & STYAN, 1997).

Es gibt bei Regenwürmern verschiedene Anpassungsreaktionen an Trockenheit:

- epigäische Regenwürmer suchen bei Trockenheit feuchte Stellen (unter Steinen oder Ästen) auf und können so eine gewisse Zeit überdauern. Längere Trockenheit ist für diese Arten aber problematisch. Die Regenwurmkokons sind jedoch relativ trockenheitsresistent und sichern so das Überleben der Population.
- anezische Regenwürmer ziehen sich in den feuchteren Unterboden zurück. Außerdem verschließen sie die Wohnröhre und verringern so die Austrocknung. Längere Trockenheit kann aber auch problematisch werden, zumal dann auch keine Nahrungsaufnahme erfolgen kann.
- die meisten endogäischen Arten ziehen sich in eine speziell dafür angelegte Höhlung bei Trockenheit zurück. Diese ist mit verdunstungshemmendem Schleim ausgekleidet. Dort trocknen sie nur allmählich aus und können so normale Trockenperioden überdauern.

Bei der umfangreichen Studie von EHRMANN et al. (2002) in Wäldern Baden-Württembergs zeigte sich, dass große Regenwurmpopulationen an Standorten mit BFS (Bodenkundliche Feuchtestufe) zwischen 2 und 10 vorkamen. Unter BFS 2 waren Artenzahl und Dichte

deutlich geringer. An trockenen Standorten (BFS <2) fehlten epigäische Arten oder kamen nur in geringer Dichte vor. Aneuzische Arten fehlten an nassen (> BFS 8) und trockenen Standorten (BFS <2) Endogäische Arten kamen bei allen Bodenfeuchten vor, die Dichte war an trockenen Standorten aber verringert.

PENEV et al. (1994) fanden beim Vergleich von Eichenwäldern in Osteuropa (Moldawien, Ukraine, Weißrußland und Rußland) keinen Einfluss des Makroklimas auf die Artendiversität, aber die Dichte korrelierte positiv mit Niederschlag und Luftfeuchte.

Eine zunehmende Sommertrockenheit ist daher prinzipiell ungünstig für Regenwürmer, besonders negativ sind Extremjahre wie 2003.

Davon ausgenommen sind Standorte an denen die Regenwürmer bisher wegen Nässe ungünstige Bedingungen hatten (z.B. Niedermoore). Solche Standorte können im Sommer tiefer trockenfallen. Dadurch werden die Bedingungen für Regenwürmer günstiger. Dies wird zu einer zusätzlichen Mineralisierung der organischen Substanz führen und damit die in der Regel unerwünschte Eutrophierung von solchen Standorten fördern.

4.2.2. Auswirkungen von Nässe im Winter

Regenwürmer können praktisch unbegrenzt im Wasser leben – solange genügend Sauerstoff im Wasser gelöst ist. Regenwürmer kommen daher in der unmittelbaren Umgebung von Fließgewässern vor. Langanhaltende stauende Nässe kann aber – insbesondere bei wärmeren Temperaturen (= größere mikrobielle Sauerstoffzehrung) kritisch für Regenwürmer sein. Wasser ist im Winter für Regenwürmer normalerweise kein Mangelfaktor. Eine zunehmende Nässe ist daher prinzipiell keine Verbesserung für Regenwürmer, sondern kann an staunassen Standorten die Population (etwas?) beeinträchtigen. Besonders ungünstig wird es wenn Polder aufgrund von zunehmenden Hochwässern häufiger und länger geflutet werden müssen. Dort ist mit einem (teilweisen) Ausfall der Regenwürmer zu rechnen (siehe auch THONON & KLOK, 2007).

4.3. Anstieg des CO₂ - Gehaltes

Aufgrund der Wurzelatmung und des Abbaus der organischen Substanz ist der CO₂ Gehalt im Boden deutlich höher als in der Atmosphäre. Regenwürmer sind daher an höhere CO₂ Gehalte angepasst. Es ist daher nicht zu erwarten dass die – im Vergleich zu den Bodengehalten - vergleichsweise geringe Erhöhung des atmosphärischen CO₂-Gehaltes deutliche direkte Auswirkungen auf Regenwürmer hat. Es sind aber indirekte Auswirkungen zu erwarten, da eine CO₂ Erhöhung die pflanzliche Produktion fördert. ZALLER & ILL (1997) fanden in Versuchen mit einer Erhöhung des CO₂-Gehaltes auch eine höhere Regenwurmaktivität gemessen an der Losungsablage an der Bodenoberfläche.

4.4. Vorkommen der wichtigsten Arten Baden-Württembergs in anderen Klimaten

Die mittleren Klimaprognosen erwarten in Baden-Württemberg ein Klima das Ähnlichkeit mit dem derzeit im Südosten von Frankreich herrschenden Klima hat (südlich von Lyon – Provence). Daher wurde untersucht ob die wichtigsten einheimischen Arten dort auch noch vorkommen (Tab. 13). Die Auswertung dieser Literatur ist – auch wg. taxonomischer Probleme - sehr zeitaufwändig, daher konnte dies nur ansatzweise erfolgen. Es zeichnet sich ab, dass die Arten *Lumbricus terrestris*, *A. caliginosa*, *A. rosea* und *A. chlorotica* auch im Süden von Frankreich vorkommen. Hingegen fehlen *A. longa*, *L. rubellus* und *O. lacteum* dort weitgehend.

Aus dem Vorkommen der Arten im Süden kann man aber nicht schließen dass die in Baden-Württemberg vorkommenden Arten die gleiche ökologische Amplitude haben. Aufgrund der langsamen Wanderung von Regenwürmern ist die Entstehung von Unterarten mit anderen ökologischen Ansprüchen wahrscheinlich. Schon das Verhalten und die Körpergröße von *L. rubellus* und *A. longa* im Großraum Stuttgart ist deutlich verschieden von dem in der Rheinebene südlich von Karlsruhe. Auch können keine Aussagen über die Biomassen getroffen werden.

Forschungsbedarf: Die Regenwurmfauna Südfrankreichs sollte näher untersucht werden (Literaturrecherchen und ggf. Felduntersuchungen)

Tab. 13: Vorkommen wichtiger Regenwurmart in Baden-Württemberg und anderen Gebieten
(nur Arten mit einer Ø Biomasse von über einem Gramm je m²)

	Ø Biomasse in Ba-Wü [g/m ²]	Vorkommen in Frankreich (BOUCHE 1977)	Bemerkungen
<i>Lumbricus terrestris</i>	14	fast überall in Frankreich mit Ausnahme des Südwestens	
<i>Aporrectodea caliginosa</i>	13	kommt im ganzen Land vor*	kommt auch in Südspanien (Sanchez et al. 1997) und im Nildelta vor (EL DUWEINI & GHABBOUR (1965)
<i>Aporrectodea longa</i>	6	selten oder fehlend im Süden*	sicher bei Dijon gefunden (KRETZSCHMAR 1991)
<i>Lumbricus rubellus</i>	5	in Mitte und Süden seltener als im Norden	
<i>Aporrectodea rosea</i>	5	in Frankreich sehr weit verbreitet (fehlt nicht im Süden)	kommt auch im Nildelta vor (EL DUWEINI & GHABBOUR, (1965)
<i>Octolasion lacteum</i>	5	begrenztes Areal, im Süden nur im Gebirge	
<i>Allolobophora chlorotica</i>	1	kommt im ganzen Land vor*	

* = Vorkommen in Frankreich teilweise unklar wegen taxonomischer Probleme

4.5. Betrachtung von Zeitreihen – welchen Einfluss hat die Witterung?

Langfristige Zeitreihen ermöglichen es wohl am besten den Einfluss der Witterung bzw. einer Klimaänderung zu erfassen. Leider werden auf den zahlreichen Bodendauerbeobachtungsflächen in Deutschland keine wirklichen Daueruntersuchungen durchgeführt. Die Zeitabstände zwischen zwei Untersuchungen sind mit ca. 6-8 Jahren in der Regel viel zu lang um einen Witterungseinfluss erkennen zu lassen. In Baden-Württemberg gibt es eine lange und zwei kürzere Zeitreihen (Abb. 9 u. Abb. 10) die auf Untersuchungen des Autors basieren.

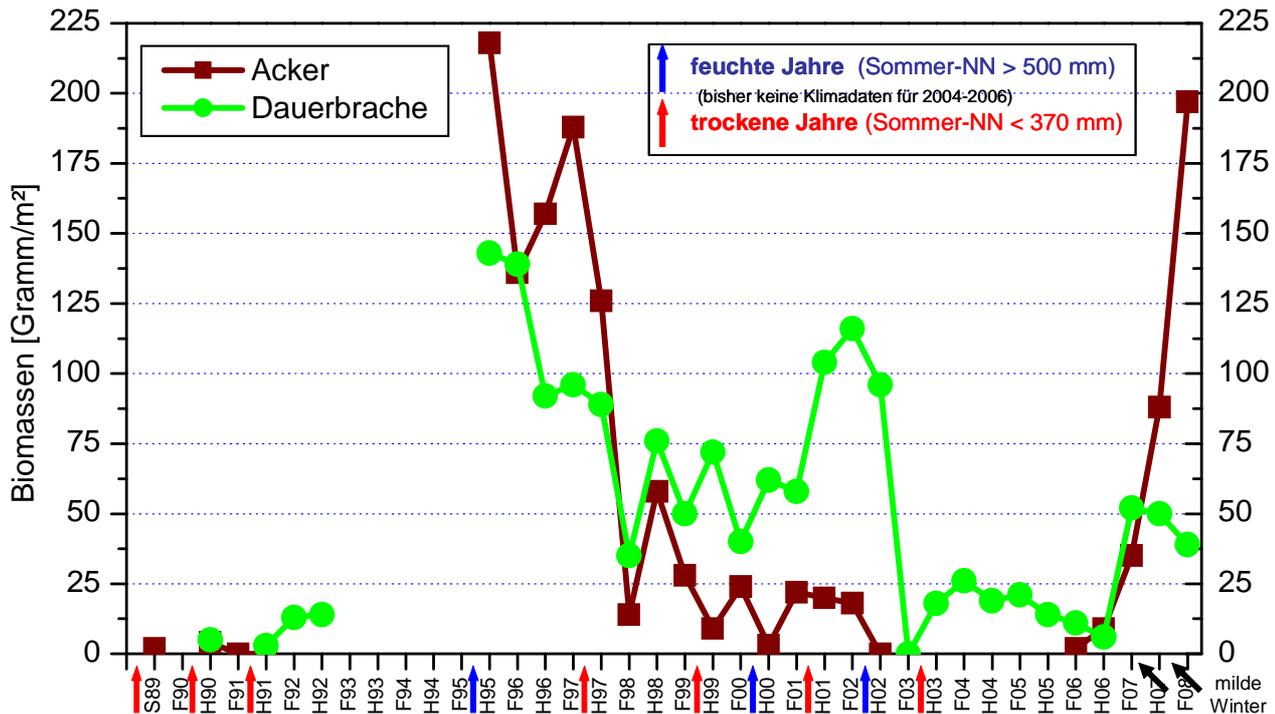


Abb. 9: Zeitreihe in Acker und Dauerbrache am Standort Kraichtal von 1989 – 2008 (keine Untersuchung von Frühjahr 1993 – Frühj. 1995)

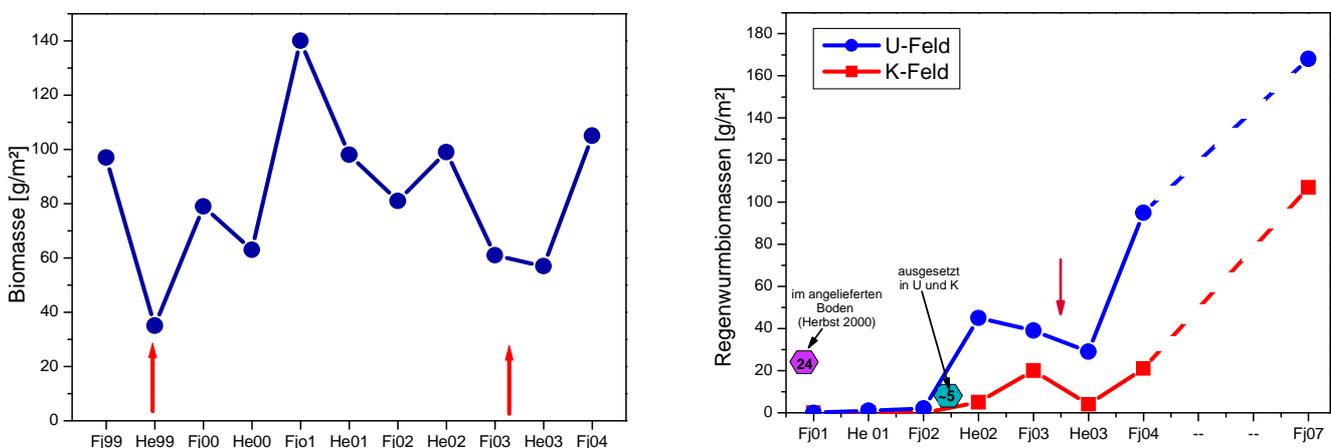


Abb. 10: Zeitreihe in einem Laubwald bei Forchtenberg (links) und in der Rekultivierungsschicht der Kreismülldeponie Böblingen (rechts)

Tab. 14: Standortdaten der untersuchten Zeitreihen

	Kraichtal	Forchtenberg	Leonberg
Vegetation	Acker: pfluglos, WRaps- WWeizen-Mais/ZRüben, Ø Intensität) Dauerbrache: Grünland 2x p.a. gemulcht	Laubmischwald, ca. 50 Jahre alt	2001 angesät und aufge- forstet (Grünland in Übergang zu Laubmischwald)
Bodentyp	Löss-Pararendzina	pseudovergleyte Parabraunerde	Rekultivierung Deponie umgelagerter Unterboden
Bodenart (Oberboden)	Uu	Lu	Ut4-Lt (Unterboden Filderlöss)
pH (CaCl ₂)	>7 (kalkhaltig)	um 4,2 (entkalkt)	>7 (kalkhaltig)
Niederschläge* [mm]	800-900	900	800-900
Ø-Temperatur* [°C]	9-10	8-9	8-9
Bemerkungen	>2 m Lössmächtigkeit Kuppenlage, erodiert	Lösslehm > 1m, sehr flacher Unterhang zusätzlich Hangzugwasser	Rekultivierungsschicht 2m mächtig, Aufnahme am Unterhang (ostexponiert)

* Quelle: WaBoA (2007)

Im **Kraichgau** wurden – mit einer kurzen Unterbrechung von Frühj. 1993 - Frühj. 1995 jeweils zweimal im Jahr Regenwürmer untersucht (Abb. 9). Die Finanzierung Anfang der 90er Jahre erfolgte aus Projektmitteln, alle weiteren Untersuchungen wurden auf eigene Kosten durchgeführt. Die Zeitreihe im Kraichgau zeigt extreme Schwankungen der Regenwurmbiomassen. Besonders ausgeprägt sind diese im Acker. Im Herbst 1995, Frühjahr 1997 und im Frühjahr 2008 werden mit Biomassen um 200 g /m² für Äcker extrem hohe Werte erreicht. Die – hier nicht dargestellte - Abundanz lag im Herbst 1995 im Acker bei 1952 Tieren je m², dies ist – von Sonderstandorten wie Komposthaufen abgesehen – die weltweit größte Zahl an Regenwürmern. Anfang der 90er Jahre und von Frühjahr 2003 - Herbst 2005 war der Acker regenwurmfrei. Die Schwankungen sind in der 1989 angelegten Dauerbrache geringer, nur Anfang der 90er Jahre fehlten Regenwürmer vollständig, aber immer noch deutlich ausgeprägt. Die plausibelste Erklärung für die niedrigen Werte sind trockene Sommer. Die Sommer 1989-91 (vor dem Ausbruch des Pinatubo) waren relativ trocken aber nicht so extrem trocken wie 2003. Durch die Kombination dieser 3 trockenen Sommer blieb die Regenwurmpopulation niedrig. Die ausgeprägte Trockenheit im Frühjahr / Sommer 2003 sorgte für einen Zusammenbruch der Regenwurmpopulation. Die hohen Abundanzen sind schwieriger zu erklären. Die hohen Werte 2007/2008 fallen mit milden Wintern und eher feuchten Sommern zusammen. Auch der Sommer 1995 war feucht. Vermutlich müssen für hohe Population eine Reihe von Faktoren (Bewirtschaftung, Witterung) günstig sein, während für einen Niedergang ein negativer Faktor (trockener Sommer) hinreichend ist.

Die Zeitreihe im Laubmischwald von **Forchtenberg** zeigt eine Depression im Herbst 1999 (der Spätsommer und Herbst waren sehr trocken) und eine weitere im Jahr 2003 (Abb. 10). Aufgrund der Unterhanglage (Zufuhr von Hangzugwasser) und vielleicht auch aufgrund der

möglicherweise anderen Regenwurmpopulation wirken sich aber Trockenjahre weit weniger negativ aus als im Kraichgau.

Auf der Kreismülldeponie **Leonberg** wurde im Herbst 2000 eine Hangfläche rekultiviert. Der eingebaute Boden (Löss-Unterboden aus Stuttgart-Vaihingen) enthielt einige Regenwürmer. Durch die Bodenumlagerung und Verdichtung beim Einbau wurden praktisch alle getötet. Erst nach dem Aussetzen von Regenwürmern im Frühjahr 2002 gab es eine deutlich positive Entwicklung. Die Trockenheit im Jahre 2003 verursachte einen deutlichen Einbruch. In der unverdichtet eingebauten Fläche (U-Feld) war dieser aber viel geringer als im konventionell verdichtet eingebauten Feld (K-Feld). Aufgrund der günstigen Standortverhältnisse erholten sich die Regenwürmer aber wieder relativ schnell.

Von EMMERLING (EHRMANN & EMMERLING 2007) wurde in einem Trockengebiet (436 mm - 648 mm Jahresniederschläge im Untersuchungszeitraum) in Rheinland-Pfalz von 1985 - 2007 einmal jährlich die Regenwürmer untersucht. Als Folge der Sommertrockenheit von 2003 zeigte sich ebenfalls ein deutlicher Rückgang der Regenwurmpopulation, die Schwankungen waren aber insgesamt geringer als beim oben untersuchten Standort Kraichgau. Dort ist der Boden, ein tief entwickelter Kolluvium-Tschernozem aus Löss in Unterhanglage, deutlich günstiger für Regenwürmer als die Pararendzina aus Löss im Kraichgau in Kuppenlage.

Die Zeitreihen zeigen auch, dass es unbedingt notwendig ist, mindestens einige wenige ausgewählte Standorte mindestens 1x im Jahr zu untersuchen. Das bisherige Konzept, Dauerbeobachtungsflächen in Abständen von einigen Jahren zu untersuchen ist viel zu empfindlich gegenüber Witterungsschwankungen. Aus dem Vergleich von 2 Terminen die z.B. 4 Jahre auseinander liegen lassen sich keine langfristigen Tendenzen ableiten – die Werte sind viel zu sehr von der aktuellen Witterung beeinflusst.

4.6. Prognose für 2 Beispielsregionen (Kraichgau und Schwäb. Alb)

Baden-Württemberg weist große Unterschiede hinsichtlich Relief, Gestein und Landnutzung auf. Daher ist die Regenwurmfauna des Landes sehr heterogen (siehe Abschnitt 2 und Ehrmann et al. 2002). Regionale Szenarien zum Klimawandel in Baden-Württemberg (KLIWA 2006) zeigen zudem, dass die allgemein prognostizierten Trends (wärmere trockenere Sommer, mildere Winter) die Regionen des Landes in unterschiedlichem Maß betreffen werden. Zwar werden grundsätzlich für das ganze Land mildere, niederschlagsreichere Winter und wärmere Sommer mit meist geringeren Niederschlägen erwartet, die Zunahme und Verteilung der Niederschläge und die Temperaturerhöhung sind jedoch regional unterschiedlich ausgeprägt. Daher wäre eigentlich eine regionalisierte Betrachtung erforderlich. Dies übersteigt den Rahmen dieser Vorstudie deutlich. Die Auswirkungen des Klimawandels sollen aber anhand der zwei sehr unterschiedlichen Regionen Kraichgau und Schwäbische Alb untersucht werden.

Das Kraichgau ist eine meist noch lössbedeckte intensiv landwirtschaftlich genutzte Landschaft nordöstlich von Karlsruhe. Sommer- und Winterniederschläge sind niedriger als auf der Mittleren Alb (Tab. 16). Die mittleren Lufttemperaturen sind ca. um 3 °C höher. Die potentielle Verdunstung ist deutlich höher, daher ist der mittlere jährliche Wasserüberschuss wesentlich geringer. Der Trockenheitsindex ist im Mittel höher, aber flachgründige Böden der Alb können ähnlich trocken sein.

4.6.1. derzeitige Regenwurmpopulationen

4.6.1.1. Regenwurmfauna Kraichgau

Zwei Seitentäler der Kraich wurden intensiv untersucht. Die Regenwurmfauna im Kraichgau zeichnet sich durch eine große Heterogenität aus (0-4 Arten). Differenzierender Faktor ist in der Agrarlandschaft vor allem das Wasserangebot und auch die Bodenart. In der stark erodierten Pararendzina fehlten 1991 Regenwürmer weitgehend (Abb. 11). Auffällig ist das vollständige Fehlen von tiefgrabenden Regenwürmern in der flurbereinigten Landschaft (Abb. 12). In der nicht flurbereinigten kommen sie vor allem an der Unterseite von Lösswänden vor. Im Wald fehlen weitestgehend tiefgrabende Regenwürmer, nur an der Grenze zur Agrarlandschaft kommen sie vor, zum Teil wegen Unterhanglage, zum Teil weil durch die landwirtschaftliche Bewirtschaftung kalkhaltige Stäube am Waldrand abgelagert werden.

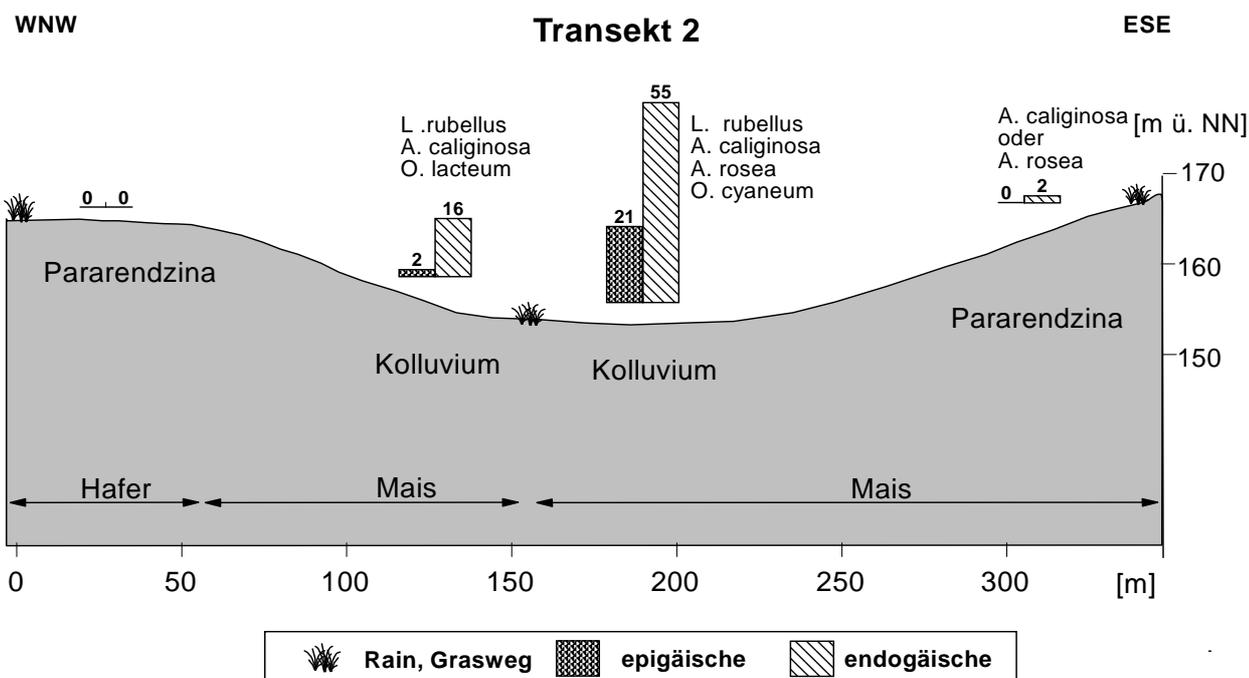


Abb. 11: Regenwurmpopulation entlang eines Transektes in einem Seitental der Kraich im Jahre 1991 (Quelle: EHRMANN 1996)

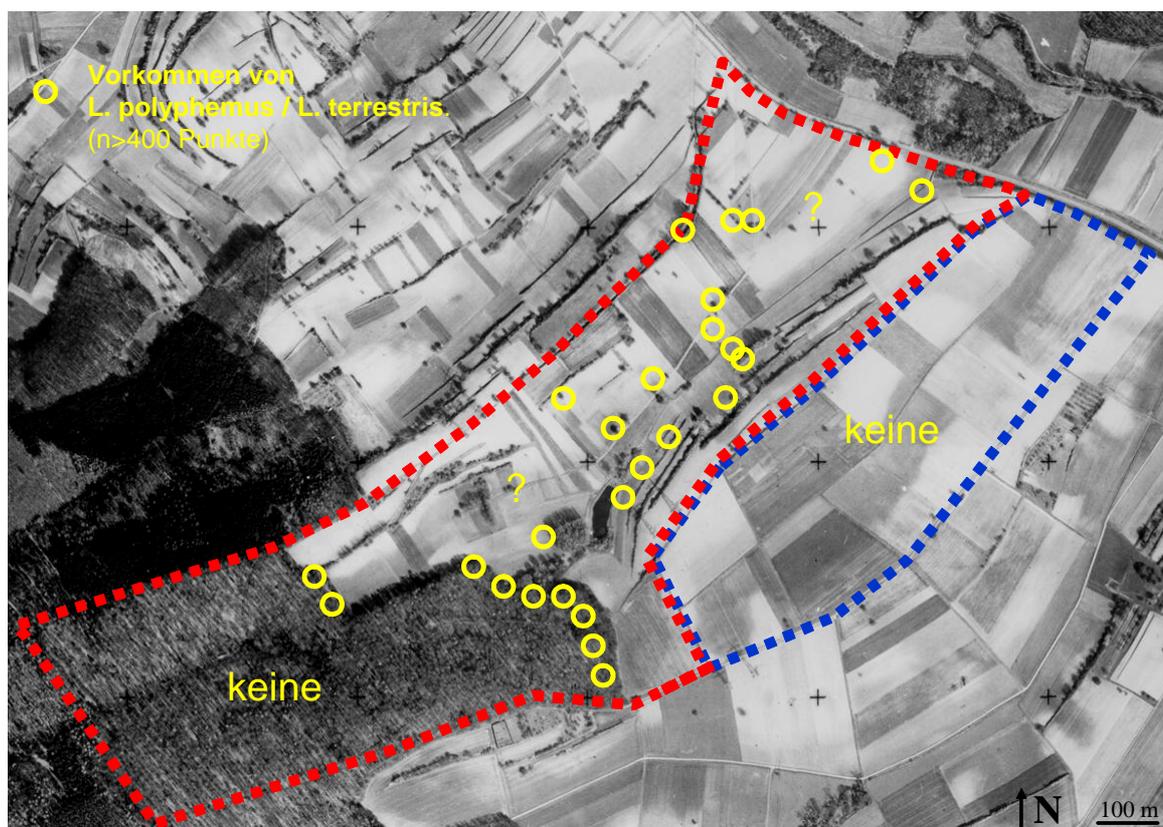


Abb. 12: Vorkommen von anezischen Regenwürmern in zwei Seitentälern der Kraich im Jahre 2003. Die blau umrandete Fläche wurde Mitte der 60er Jahre flurbereinigt. Die rot umrandete ist nicht flurbereinigt, sie weist noch zahlreiche alte Lössterassen auf. (Quelle: Ehrmann 2003b)

4.6.1.2. Regenwurmfauna Schwäbische Alb

Die Regenwurmfauna der Schwäbischen Alb ist wesentlich artenreicher (3-7 Arten, Tab. 15). An allen untersuchten Standorten wurden tiefgrabende Regenwürmer gefunden. Auch wurden meist mehr endogäische Arten gefunden. Die Biomassen und Abundanzen liegen meist über den Werten des Kraichgaus. Lediglich epigäische Regenwürmer spielen dort eine geringere Rolle – dies ist die Folge des Vorkommens der dort konkurrenzstärkeren anezischen Arten.

Tab. 15: Regenwurmpopulation von Kraichgau und Schwäb. Alb im Vergleich

	Kürzel	Bodentyp	Nutzung			Datum	Artenzahl				Biomasse				Abundanzen			
			Acker	Grünl.	Wald		epig.	anez.	endog.	alle	epig.	anez.	endog.	alle	epig.	anez.	endog.	alle
Mittlere Alb	BL	CF			x	5/98	/	1	4	5	/	13	35	50	/	59	139	208
	EG	CF			x	5/98	/	1	4	5	/	47	70	116	/	53	132	185
	EN	RR			x	5/98	/	2	1	3	/	41	18	60	/	42	44	86
	GO	YK			x	5/98	1	2	4	7	3	16	51	70	15	19	163	197
	TRO	CF		x		9/95	1	1	3	5	119	119	167	286	20	20	694	714
	TRO	CF	x			9/95	2	1	3	6	11	11	160	171	230	230	933	1163
Ostalb	ME	LL-CF		x		9/91	1	1	3	5	20	20	31	51	108	108	222	330
	ME	LL-CF	x			9/91	/	1	3	4	/	9	9	18	/	37	43	80
	NE	CF			x	5/07	1	1	3	5	35	155	21	211	45	54	79	178
	NE	CF	x			5/07	1	1	4	6	1	26	31	57	12	22	309	343
	Dip	LL-Cf	x			10/95	/	3	1	4	/	11	13	24	/	25	83	109
	Dip	LL-Cf		x		10/95	/	3	1	4	/	12	64	76	/	9	291	301
Kraichgau	MK	RZ			x	5/98	1	/	3	4	63	/	23	88	157	/	43	203
	MR	LL			x	6/98	1	/	1	2	3	/	6	9	7	/	10	17
	T23	RZ	x			10/91	/	/	1	1	/	/	2	2	/	/	21	21
	TR22	YK May	x			10/91	1	/	3	4	21	/	55	76	58	/	119	177
	T11	LL Fr	x			10/91	1	/	3	4	4	/	26	31	34	/	86	119
	T12	YK Fr	x			10/91	1	/	1	2	3	/	55	58	33	/	247	280
	T16	RZ Glo	x			10/91	/	/	2	2	/	/	24	24	/	/	59	59
	T15	RZ GIm	x			10/91	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
	T14	YK Gl	x			10/91	1	/	1	2	0	/	4	4	1	/	5	7
	TSa	YK	x			9/92	1	/	2	3	2	/	16	17	2	/	27	29
	TSa	YK		x w		9/92	1	/	4	5	0	/	66	66	6	/	167	173
	Sa	LL Hof				4/98	/	1	2	3	/	54	17	70	/	19	50	69

Bodentyp: CF=Terra Fusca, RR= Rendzina, YK= Kolluvisol, LL=Parabraunerde, RZ= Pararendzina,

4.6.2. Prognose der zukünftigen Entwicklung

Die Sommerniederschläge (Mai-Oktober) sollen in beiden Regionen um ca. 2-10% abnehmen (KLIWA 2006). Die Winterniederschläge sollen auf der Schwäbischen Alb geringfügig zunehmen (2-5%) im Kraichgau hingegen deutlich (10-20%). Das Jahresmittel

der Lufttemperatur soll in beiden Regionen um knapp 2°C ansteigen (2021-2050/1971-2000), wobei die Zunahme im Winterhalbjahr etwas deutlicher ausfallen soll.

4.6.2.1. Kraichgau

Günstig werden sich die höheren Niederschläge im Winter bei etwas höheren Temperaturen auswirken. Ungünstig sind höhere Sommertemperaturen bei geringeren Niederschlägen. In der Summe wird sich die Änderung vermutlich negativ auswirken, da die Regenwürmer eine Entwicklungszeit von ca. einem Jahr im Freiland haben (EDWARDS & LOFTY,1977; GRAFF 1953) und entscheidend wird dann die ungünstigere Sommerwitterung sein. Dass die Regenwurmfauna im Kraichgau schon derzeit an manchen Standorten (Pararendzinen) sehr deutlich unter Sommertrockenheit leidet, zeigt die Abb. 9 und die Transekte in Abb. 12. Hinzu kommt, dass die Regenwurmfauna artenärmer ist, meist nur epigäische und endogäische Arten vorkommen und epigäische Arten deutlich sensibler auf Witterungsungunst reagieren als anezische Arten.

4.6.2.2. Schwäbische Alb

Auf der Schw. Alb wird sich die mildere Winterwitterung deutlich günstiger auswirken. Der Aktivitätszeitraum wird sich deutlich verlängern. Der etwas trockenere Sommer wird vor allem den dort sowieso nicht bedeutenden epigäischen Regenwürmern Probleme bereiten. Die tiefgrabenden Regenwürmer können sich problemlos in feuchtere Spalten des klüftigen Kalkgesteines zurückziehen. Die Schutzmechanismen von endogäischen Arten sind gegenüber Sommertrockenheit hinreichend. Vermutlich werden die Populationen weiterhin vor allem durch Bewirtschaftung (Pestizide und Bodenbearbeitung im Acker) und durch Nahrungsanfall limitiert.

Tab. 16: ausgewählte Klimadaten von Kraichgau und Schwäb. Alb (Zeitraum 1961-90)

	Kraichgau	Schwäbische Alb*
mittlere korrigierte Niederschläge	800 - 900	1000 - 1100
Sommerniederschlag [mm]	400 - 500	500 - 600
Winterniederschlag [mm]	400 - 500	400 - 500
mittlere Lufttemperatur [°C]	9 - 10	6 - 7
mittlere Wintertemperatur [°C]	4 - 5	0 - 1
Januartemperatur [°C]	0 - 1	-3- -2
Sommertemperatur [°C]	15 - 16	11 - 13
pot. Verdunstung [mm]	600 - 650	450 - 500
mittlere klimatische Wasserbilanz [mm]	200 - 300	500 - 600
Trockenheitsindex	60 – 80	30 – 60

* Durchschnittswerte Mittlere Alb (um Engstingen) und Ostalb (um Ebnat)
Quelle: WaBoA (2007)

4.7. Fazit: mögliche Reaktion von Regenwurmpopulationen bei verschiedenen Szenarien

4.7.1. langfristig mildere Winter und trockenere, wärmere Sommer ohne Extremjahre

Die Bedingungen für die Regenwürmer werden im Winter in den meisten Landesteilen günstiger und im Sommer besonders in den wärmeren und trockeneren Gebieten Baden-Württembergs deutlich ungünstiger, da die Regenwurmfafa nur bedingt an Sommertrockenheit angepaßt ist. Eine Bilanz für das gesamte Jahr ist allerdings schwierig. Vermutlich werden in den meisten Regionen des Landes die Anzahl und Biomasse der Regenwürmer abnehmen, während in den Höhenlagen möglicherweise eine Zunahme zu verzeichnen ist.

4.7.2. ein extrem trockener Sommer (wie 2003)

Ein extrem trockener Sommer wie 2003 wird an den trockeneren Standorten zu einem Verlust der meisten Regenwürmer führen. Einzelne Regenwürmer werden aber die Trockenheit überdauern und auch ein großer Teil der Regenwurmeier im Kokon. Die Population kann sich vor allem aus frisch geschlüpften Regenwürmern wieder neu aufbauen, dies kann einige Jahre dauern (siehe Abb. 9). An den feuchten Standorten wird der Rückgang geringer sein und die Population wird sich schneller wieder erholen.

4.7.3. zwei extrem trockene Sommer (wie 2003) unmittelbar aufeinander folgend

Dieses bisher nicht eingetretene Szenario würde die Regenwurmpopulation empfindlich treffen. Die Generationszeit (Ei bis adulter Wurm) beträgt bei den Regenwürmern im Freiland ca. ein Jahr (EDWARDS & LOFTY, 1977; GRAFF 1953). Das erste trockene Jahr könnten zwar noch die Eier in den besser geschützten Kokons überdauern aber diese geschlüpften Würmer würden im zweiten trockenen Sommer eliminiert bevor sie selbst wieder Eier ablegen könnten. Daher droht bei zwei trockenen Sommern unmittelbar hintereinander ein Rückgang der Regenwürmer an den trockeneren Standorten auf großer Fläche. Eine Neubesiedlung von feuchteren Standorten in der Landschaft müßte stattfinden. Aufgrund der geringen Wanderungsgeschwindigkeit der Regenwürmer (siehe folgendes Kapitel) würde es vermutlich auch bei günstiger Witterung in den Folgejahren längere Zeit (Vermutung: ca. 4-8 Jahre) dauern bis der frühere Zustand wieder erreicht ist.

5. Probleme der (Wieder)Besiedlung

Nach extrem trockenen Sommern können einige oder ggf. alle Regenwurmarten eines Standortes absterben. Die Regenwürmer müssen dann von Standorten in der Landschaft an denen sie überdauern wieder einwandern. Während viele Organismen (z.B. Vögel) neue Areale sehr schnell besiedeln können, ist dieser Prozess bei Regenwürmern extrem langsam und muß daher näher betrachtet werden.

5.1. aktive Wanderung von Individuen

Der Boden weist kein kontinuierliches horizontales Wegesystem auf. Regenwürmer wandern daher (nur bei feuchtem Wetter) an der Bodenoberfläche um neue Habitate zu besiedeln. Einzelne Individuen von *Lumbricus terrestris* können in einer Nacht ca. 4 - 19 m zurücklegen (MATHER & CHRISTENSEN, 1988). Eigene Untersuchungen ergaben eine Geschwindigkeit von 20-40 cm / Minute.

Im Wasser können sie sich im Gegensatz zu den nah verwandten Blutegelein nicht gerichtet bewegen. Daher sind Wasserläufe ebenso wie vielbefahrene Strassen ein kaum zu überwindendes Hindernis. Auch ungünstige Standortsverhältnisse können die Ausbreitung verhindern, z.B. können stärker versauerte Wälder von den meisten Arten nicht durchquert werden. Im Kraichgau können die aufgrund der intensiven landwirtschaftlichen Nutzung erodierten und damit tonarmen Hänge wohl offensichtlich nicht von anezischen Arten überquert werden.

5.2. Wanderung von Regenwurmpopulationen

Betrachtet man aber die tatsächliche Ausbreitung von Populationen so kommt man zu deutlich geringeren Geschwindigkeiten. Die Messung der Ausbreitung von Populationen ist allerdings schwierig, da es in der Regel selten regenwurmfreie Gebiete gibt die gleichzeitig auch günstige Bedingungen für Regenwürmer aufweisen.

- In neu angelegten holländischen Poldern konnten solche Untersuchungen durchgeführt werden (Tab. 17).
- Im Kraichgau waren nach Trockenperioden Anfang der 90er die Regenwürmer im Acker bei "normaler Bewirtschaftung" bei Null, in der Luzerne aufgrund des günstigeren Mikroklimas aber sehr hoch. Ein Teil des Ackers wurde mit der für Regenwürmer sehr günstigen Luzerne eingesät und die Einwanderung untersucht (Abb. 13). Es zeigte sich, dass einzelne Individuen in einem Jahr max. 20 m weit wanderten, die Population im Mittel aber weniger als 10 m.
- In präalpinen Weiden in der Schweiz wurde mit der Pflanzung einer Hecke Regenwurmarten aus dem Unterland eingeschleppt (DANIEL et al. 1996). Diese haben sich in ca. 20 Jahren um ca. 170 m ausgebreitet (=8,5 m/a).

Tab. 17: Jährliche Ausbreitung von Regenwurmpopulationen in neu angelegten holländischen Poldern

	HOOGERKAMP et al. (1983)	MARINISSEN & VAN DEN BOSCH (1992)	STEIN et al. (1992)
Nutzung	Grünland	vorwiegend Acker	Grünland
Zeitraum [Jahre]	8	35	12
jährliche Ausbreitung [m]			
<i>L. rubellus</i>	-	6	7-10
<i>L. terrestris</i>	5	-	-
<i>A. longa</i>	-	-	7-10
<i>A. caliginosa</i>	9	5	10-14

Die Diskrepanz zwischen der relativ hohen Geschwindigkeit einzelner Individuen und der sehr langsamen Ausbreitung von Regenwurmpopulationen erklärt sich zum einen daraus, dass die Wanderungen einzelner Individuen nicht zielgerichtet erfolgen und zum anderen, dass einzelne Individuen, die besonders weit gewandert sind, oft für die Population verloren sind. Zwar können sich manche Regenwurmart auch durch Parthenogenese vermehren, viele einheimische Arten, darunter die wichtigsten Lumbricus-Arten, pflanzen sich ausschließlich sexuell fort (LEE 1985.). Die Partnerfindung erfolgt vor allem an der Bodenoberfläche und dort nur über sehr kurze Distanz (bei *L. terrestris* <50 cm), da zur Begattung in aller Regel die sichere Wohnröhre nicht verlassen wird. Eine Paarung setzt daher einen Partner in unmittelbarer Nähe voraus. Daher haben einzelne Individuen, die weiter als die Population gewandert sind, bei Arten mit sexueller Fortpflanzung nur eine geringe Chance auf Vermehrung.

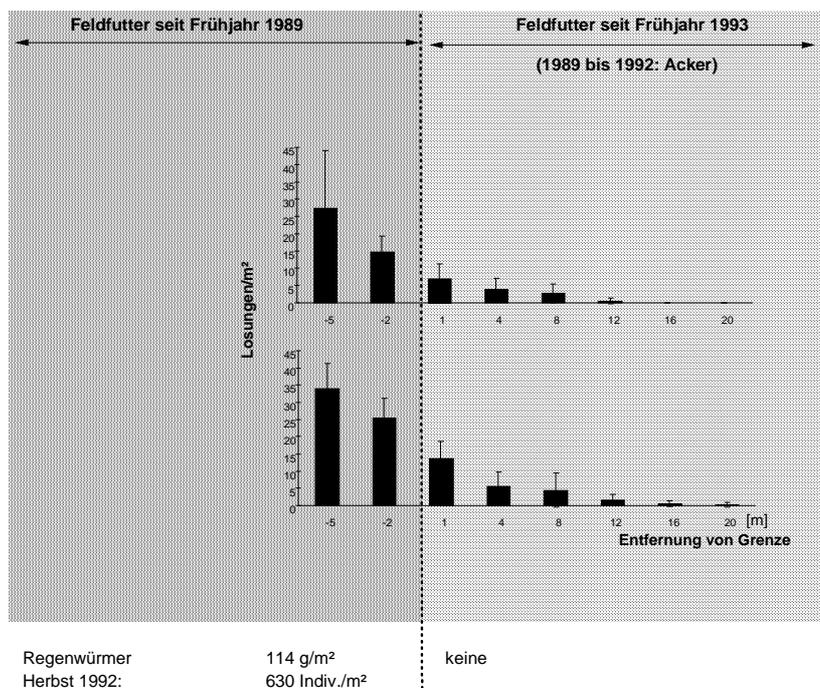


Abb. 13: Einwanderung von Regenwürmern in eine neu angelegte Luzernefläche (erfaßt wurde die Anzahl von Losungen an der Bodenoberfläche im Frühjahr 1994; die zwei Transekte sind lagegetreu eingezeichnet; Quelle: EHRMANN 1996)

5.2.1. passive Ausbreitung

Die nacheiszeitliche Besiedlung Mitteleuropas oder Skandinaviens mit Regenwürmern ist mit der geringen Geschwindigkeit der aktiven Ausbreitung nicht zu erklären – in 10000 Jahren hätten die Regenwürmer gerade einmal 100 km zurücklegen können. Dies ist nur mit dem passiven Transport von Regenwürmern zu erklären.

Früher waren die passive Ausbreitung über Tiere (z.B. Kokons im Fell von suhlenden Wildschweinen oder über Vögel) und der Transport in Flußsystemen sicher die wichtigsten Faktoren. Mittlerweile dürfte aber der anthropogene Faktor relevanter sein. Beim direkten Transport von Boden oder indirekt über den Transport von Pflanzen werden Regenwürmer relativ häufig verschleppt. So wurden z.B. in den Böden von Pflanzgut europäische Regenwurmartens weltweit über die gemäßigte Zone verbreitet. Bei der Bodenumlagerung im Zuge von Baumaßnahmen werden allerdings die meisten Regenwürmer vernichtet (> 99,9% EHRMANN 2003a) und weit verlagerte Regenwürmer müssen erst einmal einen Geschlechtspartner finden. Der passive Transport ist umso wahrscheinlicher je größer ein Gebiet ist und je länger die Zeitdauer ist. Für die Wiederbesiedlung eines Ackers nach einem witterungsbedingten Aussterben dürfte er aber in der Regel keine große Rolle spielen, da das Ereignis doch zu selten ist.

5.2.2. kann die Ausbreitung der Regenwürmer mit der Verschiebung der Klimazonen mithalten?

Die durchschnittliche aktive Ausbreitungsgeschwindigkeit der Regenwürmer liegt bei < 10m/Jahr, in 100 Jahren können Regenwürmer also maximal 1 km zurücklegen. Die gängigen Klimaprognosen lassen aber eine Verschiebung der Klimazonen um mehrere 100 km in einem Jahrhundert erwarten. Die aktive Ausbreitung der Regenwürmer kann also mit dem Klimawandel überhaupt nicht Schritt halten!!

Längerfristig (?Jahrhunderte bis Jahrtausende?) ist die Kombination von der selteneren passiven Ausbreitung – bei der aber schnell große Entfernungen zurückgelegt werden können – und der aktiven Ausbreitung von diesen Flächen aus - entscheidend. Daher dürften Regenwürmer – wenn sich die Klimazonen um mehrere 100 km nach Norden verschieben und dann stabil bleiben - sich in einigen Jahrhunderten angepaßt haben. Mindestens in den nächsten hundert Jahren wird die Einwanderung von besser angepaßten Arten nur geringe Bedeutung haben und es wird vor allem die Anpassungsfähigkeit der einheimischen Population entscheidend sein.

5.3. Fazit Besiedlung

Die Wanderungsgeschwindigkeit der Regenwürmer ist vermutlich eine der niedrigsten im Tierreich. Die meisten kleineren Tiere werden viel öfter passiv verfrachtet. Alle anderen größeren Tiere haben eine wesentlich höhere Wanderungsgeschwindigkeit.

Die Ausbreitung der Regenwürmer kann daher überhaupt nicht mit der Verschiebung der Klimazonen Schritt halten. Falls die Anpassungsfähigkeit der einheimischen Arten überstrapaziert wird ist eine aktive gezielte Einbringung von Regenwürmern durch den Menschen zur Vermeidung von Schäden notwendig. Eine solche Maßnahme erfordert sehr langfristig angelegte Untersuchungen und Vorbereitungen.

6. Vorschläge für die Dauerbeobachtung von Regenwürmern

6.1. derzeitige Untersuchungskonzepte in anderen Bundesländern

In Baden-Württemberg werden noch keine Regenwürmer auf Dauerbeobachtungsflächen untersucht. In Bayern werden Regenwürmer in ca. 130 Dauerbeobachtungsflächen (1,9 DBFs je 1000 km² Landesfläche; nur Acker und Grünland;) untersucht. In Schleswig-Holstein werden in 39 Dauerbeobachtungsflächen Regenwürmer untersucht (2,5 DBFs je 1000 km²). In den ostdeutschen Ländern Sachsen-Anhalt und Thüringen werden insgesamt 73 Flächen Regenwürmer (2,0 DBFs je 1000 km²) untersucht. Das Untersuchungsintervall in Bayern beträgt 8 Jahre, das Intervall in den anderen Bundesländern ist dem Autor nicht genau bekannt, vermutlich ist es ähnlich lang oder etwas kürzer als in Bayern.

Übertragen auf Baden-Württemberg würde dies die Untersuchung von Regenwürmern auf ca. 72 Dauerbeobachtungsflächen (Annahme 2,0 DBFs je 1000 km²) alle ca. 6-8 Jahre bedeuten. In Deutschland würde man nach diesem Konzept insgesamt ca. 720 Dauerbeobachtungsflächen auf Regenwürmer untersuchen. Hinsichtlich Klimawandel ist dieses Konzept nach Meinung des Autors nicht optimal:

1. Die Anzahl der Flächen ist viel zu hoch. Um die Auswirkungen des Klimawandels auf Regenwürmer festzustellen reichen in D vermutlich auch ca. 120 Flächen
 - 30 Waldstandorte
 - 30 Grünlandstandorte
 - 30 Ackerstandorte
 - 30 Sonderstandorte (Moore, Hochgebirge, Innenstadt etc)
2. Das Untersuchungsintervall ist mit 6-8 Jahren viel zu lang!! Wenn nur alle 6-8 Jahre eine Untersuchung durchgeführt wird, dann können langfristige Trends in der Regel erst nach Jahrzehnten festgestellt werden. Kurzfristige Trends aufgrund der vorhergehenden Witterungen überlagern außerdem die langfristigen Tendenzen (siehe Standort Kraichtal).

Derzeit gibt es außerdem in keinem Bundesland ein Untersuchungskonzept mit dessen Ergebnissen sich Verbreitungskarten erstellen lassen. Obwohl in manchen Bundesländern relativ viele Dauerbeobachtungsflächen untersucht reicht die Informationsdichte nicht für eine kartographische Darstellung aus. Veränderungen des Areals würden aber wesentlich besser als die Punktaufnahmen an den Dauerbeobachtungsflächen langfristige Tendenzen erkennen lassen.

6.2. Konzept für Regenwurmuntersuchungen in Baden-Württemberg

Daher möchte der Autor hinsichtlich Klimawandel folgendes Konzept vorschlagen:

- Untersuchung der Regenwurmpopulation von ca. 10-12 ausgewählten Dauerbeobachtungsflächen in kurzen Intervallen (1 Jahr). Falls notwendig können zusätzliche Standorte in längeren Intervallen (ca. 5-8 Jahren) beprobt werden.
- Erfassung des Verbreitungsgebietes von 2 ausgewählten anezischen Arten in Abständen von 5-8 Jahren

6.2.1. Untersuchung von Dauerbeobachtungsflächen

Die Regenwurmfafa Baden-Württembergs ist aufgrund von umfangreichen Untersuchungen weitgehend (es sind noch einige Lücken zu schließen) bekannt. Daher könnte man auf Basis dieser Daten gezielt Standorte auswählen. Folgende Auswahl wird für ein Minimalprogramm vorgeschlagen:

- 3 Grünlandflächen (differenziert nach Feuchte: trocken - mittel - feucht)
- 4-6 Waldflächen (differenziert nach Feuchte und pH: trocken u. pH<4; trocken u. pH > 4,5; mittel u. pH <4?; mittel u. pH > 4,5; feucht u. pH >4,5?, feucht u. pH <4). Eventuell kann man 2 Kombinationen weglassen. Wälder weisen eine deutlich größere Amplitude bei den Boden- und Standortseigenschaften als Grünland und Äcker auf, daher muss bei Wäldern die Anzahl der untersuchten Standorte größer sein.
- 1 Moor? Der Wasserhaushalt von Mooren kann sich im Zuge des Klimawandels deutlich ändern.
- Ackerflächen? Die Untersuchung von Äckern wäre an sich zwar sehr sinnvoll, da aber die Nutzungseinflüsse oft die Witterungseinflüsse überlagern, sind einige Standorte erforderlich um einen Klimaeinfluss zu erkennen. Dies könnte den Rahmen eines Minimalprogrammes übersteigen. Im Rahmen eines bundeseinheitlichen Monitorprogrammes wären dann aber Ackerflächen in Baden-Württemberg sinnvoll.
- Fortführung der Dauerfläche Kraichtal (Untersuchungen durch den Autor seit 1989!).

Termin: grundsätzlich reicht ein Fang im Jahr (Frühling), zusätzlich Beprobungen im Herbst sind nur nach sehr trockenen Sommern oder anderen Extremereignissen notwendig.

6.2.2. Erfassung der Verbreitung von 2 ausgewählten anezischen Arten

Anezische Regenwürmer hinterlassen charakteristische Spuren an der Bodenoberfläche. Diese Spuren können im Acker und Wald von einer Fachkraft relativ leicht erkannt werden und daher zur Erfassung des Vorkommens genutzt werden. Der Aufwand hierfür ist im Vergleich zu Regenwurmfängen sehr gering. Dadurch können viele Flächen bearbeitet werden. Dies ermöglicht eine flächenhafte (Karte) oder linienhafte (Transekt) Darstellung des Vorkommens. Damit können Veränderungen wesentlich besser erkannt werden als mit

den vergleichsweise kleinen Flächen (ca. 1m²) von Regenwurmfängen auf Dauerbeobachtungsflächen. Auch unterliegt der Parameter "Vorkommen" geringeren Schwankungen als "Abundanz/Biomasse". Für eine solche Untersuchung kommen vor allem zwei Regenwurmart in Frage:

Lumbricus terrestris

Lumbricus terrestris ist der Regenwurm mit der größten Biomasse im Landesdurchschnitt (Tab. 2). Er weist eine Stetigkeit von 50 % aus. Seine tiefreichenden Röhren sind wichtige Wege für Wasser, Luft und Wurzeln. Vermutlich ist er der wirtschaftlich wichtigste Regenwurm Baden-Württembergs.

Daher sollte man das Vorkommen von *Lumbricus terrestris* anhand von sorgfältig ausgewählten Transekten in den wichtigsten Landschaften Baden-Württembergs (ca. 10) untersuchen. Die Transekte sollten jeweils mehrere 100m lang sein. Dabei werden alle Vorkommen von *L. terrestris* erfaßt und in einer Karte eingetragen. Dies erfordert einen Aufwand von einem Arbeitstag je Transekt im Gelände. Da der Aufwand für einen Punkt sehr gering ist können damit auch Agrarlandschaften – die wegen der Variabilität der Nutzung einen hohen Stichprobenumfang erfordern - sinnvoll bearbeitet werden.

Lumbricus badensis

Lumbricus badensis ist der mit Abstand größte Regenwurm Deutschlands. Sein Verbreitungsgebiet ist auf mittlere und höhere Lagen des Südschwarzwalds mit atlantisch geprägten Klima beschränkt.. Die Arealuntergrenze korreliert relativ gut mit Isolinien des Trockenheitsindex. Daneben spielen noch geologische Faktoren eine Rolle. *L. badensis* meidet Kalkstein und kommt selten im Buntsandstein vor. Der Regenwurm hat aufgrund seiner Grableistung (große Röhren bis in 4m Tiefe) und seiner Rolle beim Streuabbau (bei Präsenz von *L. badensis* ist die Humusform günstiger) einen großen Einfluss auf den Standort (LAMPARSKI 1985).

Das Areal von *L. badensis* sollte aus mehreren Gründen dringend genau untersucht und zukünftig regelmäßig beobachtet werden:

- a) aufgrund seiner Empfindlichkeit gegenüber klimatischen Einflüssen und seiner geringen Mobilität ist *L. badensis* ein sehr gut geeigneter Indikator für die Auswirkungen des anthropogen verursachten Klimawandels
- b) *L. badensis* kommt weltweit ausschließlich im Südschwarzwald vor. Das Land Baden-Württemberg hat daher eine besondere Verantwortung für diese Regenwurmart.
- c) *L. badensis* kann aufgrund klimatischer und geologischer Schranken nicht in ein anderes für ihn geeignetes Areal wandern.

7. Diskussion von möglichen Anpassungsmaßnahmen

7.1. allgemeine Maßnahmen

Gestaltung der Kulturlandschaft: Durch die Vergrößerung der Schläge und des Entfernens von Strukturen wie Hecken und Einzelbäumen hat sich die Vielfalt der Agrarlandschaft drastisch verringert. Aufgrund der Spezialisierung der landwirtschaftlichen Betriebe werden nur noch wenige Kulturpflanzen angebaut. Diese uniformen Bedingungen vermindern die Chance auf das Überleben von Regenwurmpopulationen bei extremer Witterung.

Verzicht auf **Drainagen/Entwässerung**. Durch Entwässerungsmaßnahmen wurde vielerorts der Wasserhaushalt vereinheitlicht. Einige feuchte Stellen würden das Überleben in Trockenjahren verbessern und so eine schnellere Wiederbesiedlung ermöglichen.

7.2. differenziert nach Nutzungstyp

7.2.1. Wald

Baumartenzusammensetzung: Laubwald ist wegen der geringeren Interzeption und der leichter abbaubaren Streu in der Regel günstiger als Nadelwald. Große Nadelforste sollten daher zumindest kleine Inseln an Laubwald enthalten.

Kalkung. Regenwürmer reagieren z.T. sehr empfindlich auf Versauerung. Bei pH-Werten < 4 (CaCl_2) kommen daher meist nur noch wenige epigäische Arten vor. Eine Kalkung ist daher günstig für Regenwürmer (AMMER & MAKESCHIN 1994, EHRMANN & FEGER 2006). Dabei sollte die Kalkung so rechtzeitig erfolgen, dass auch die anspruchsvolleren anezischen und endogäischen Arten überleben können. Allerdings kann eine unangemessene Kalkung auch einfach nur die Humusaufgabe abbauen und so die Wasserspeicherung verringern (EHRMANN & FEGER 2006).

7.2.2. Grünland

Grünland weist in aller Regel die höchsten Regenwurmabundanzen und –biomassen auf. Ursache sind günstige Bodenfeuchte und pH-Werte und eine fehlende Bodenbearbeitung. Daher sind prinzipiell die Verbesserungsmöglichkeiten geringer als bei Acker oder Wald. Kleine Verbesserungen wären Erhaltungskalkung an zur Versauerung neigenden Standorten und Düngung mit Stallmist anstelle von Gülle.

7.2.3. Ackerbau

Aufgrund der zahlreichen versch. Maßnahmen sind hier auch die größten Steuerungsmöglichkeiten gegeben:

- **Größe der Schläge:** Ackerbewirtschaftung kann oft ungünstig sein, daher sollten die Schläge nicht zu groß sein oder sie sollten eine für Regenwürmer günstigen Struktur enthalten (z.B. eine unbearbeitete Baumscheibe oder eine nicht drainierte feuchte unbearbeitete Stelle im Schlag).
- **Feldraine** sollten nicht völlig aus der Agrarlandschaft verschwinden, denn sie weisen oft mehr Regenwürmer auf als die umgebenden Äcker (EHRMANN 1994).

- **Fruchtfolge:** die früher übliche mehrgliedrige Fruchtfolge mit dem Anbau von Klee gras oder Luzerne war wesentlich günstiger als die heutigen vereinfachten Fruchtfolgen. Die Unterschiede der Regenwurm populationen bei normaler Ackerbewirtschaftung und Luzerneanbau sind vor allem in trockeneren Gebieten wie dem Kraichgau drastisch (EHRMANN 1996). Das mehrjährige Ackerfutter wurden weitgehend durch den für Regenwürmer sehr ungünstigen Silomais ersetzt.
- **Bodenbearbeitung** ist prinzipiell negativ für Regenwürmer. Je tiefer und je intensiver die Bearbeitung erfolgt und je feuchter der Boden ist umso negativer wirken sich die Maßnahmen aus. 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 (BARNES & ELLIS 1979, EDWARDS 1980, KLADIVKO et al. 1997). EHRMANN (1997) zeigte, dass direkt gesäte Acker in Baden-Württemberg mehr Regenwürmer aufwiesen.
- **Pestizide** sind je nach Mittelgruppe mehr oder weniger schädlich. Die Tests im Rahmen der Zulassung sind zwar aufwändig aber erfolgen z.T. aus technischen Gründen mit den falschen Arten (*Eisenia foetida* statt z.B. *Lumbricus terrestris*). Daher wird es auch in Zukunft negative Überraschungen geben. Schädlich sind z.B. Mittel die Kupfer enthalten oder manche systemische Fungizide aus der Benomylgruppe.
- **Ertragshöhe:** Die mittlerweile sehr hohen Erträge im konventionellen Ackerbau bedingen auch einen größeren Verbrauch an Bodenwasser. Dies reduziert die Feuchte auch im Unterboden.
- **Düngung:** Gülle in sehr hohen Mengen kann die Regenwürmer schädigen (CURRY 1976). Mineralische Dünger erhöhen die Phytomasse und somit auch das Nahrungsangebot. Manche Mineraldünger (z.B. Ammoniumsulfat) senken allerdings den pH und wirken so negativ auf Regenwürmer (MA et al. 1990). Kalkstickstoff hat eine direkte toxische Wirkung auf Bodentiere.

7.3. Aussetzen von Regenwürmern

Als "letzte Maßnahme" können auch Regenwürmer künstlich in regenwurmfreie Flächen eingebracht werden (Beispiele siehe EHRMANN 2003, STOCKDILL 1982). Das Aussetzen von einheimischen Regenwürmern ist relativ unproblematisch und kostengünstig, hingegen wären vor dem Aussetzen von südeuropäischen Regenwürmern umfangreiche wissenschaftliche Untersuchungen erforderlich.

7.4. Fazit

Die möglichen Folgen des Klimawandels auf Regenwurm populationen können – sofern sie negativ sind – abgemildert werden. Es sind eine ganze Reihe von Maßnahmen möglich die auch nicht unbedingt aufwändig sein müssen.

8. Forschungsbedarf

8.1. Zusammenstellung der Regenwurmfauna Baden-Württembergs

In Baden-Württemberg wurden relativ häufig Regenwürmer untersucht (siehe 2). Die Zusammenstellung dieser Daten wäre eine sinnvolle Basis für zukünftige Untersuchungen. Außerdem könnte man später mit gezielten Nachuntersuchungen von schon untersuchten Standorten Aussagen über den Einfluss des Klimawandels erhalten. Bei der Zusammenstellung sollten auch die wesentlichen biotischen und abiotischen Standortparameter mit erfasst werden. Einige wenige Standortstypen wurden bisher nicht untersucht. Bei diesen sollte man Nachuntersuchungen durchführen..

8.2. Einrichtung von Dauerbeobachtungsflächen

siehe Abschnitt 6.2

8.3. spezielle Untersuchungen zum Klimawandel

- Einrichtung eines Feldversuches zur Untersuchung der Auswirkung von ausgeprägter Sommertrockenheit auf die Regenwurmfauna: Regenwürmer werden dabei in abgegrenzten Flächen gehalten. Durch temporäres Abdecken bei weiterhin gegebener Belüftung und Besonnung wird eine verlängerte Sommertrockenheit (Extremjahr) simuliert.
- Zusammenstellung von Daten über die Regenwurmfauna Südfrankreichs. Die Region südlich von Lyon weist derzeit ein Klima auf welches Ähnlichkeit mit dem zukünftigen von Baden-Württemberg haben könnte. Da in Frankreich das Vorkommen von Regenwürmern schon vor Jahrzehnten untersucht und zusammengestellt wurde (Bouche 1977) ist eine gute Datenbasis vorhanden. Damit kann die mögliche zukünftige Regenwurmfauna Baden-Württembergs und ihre zukünftige Bedeutung für relevante Prozesse in Böden prognostiziert werden.

8.4. weitere Untersuchungen

Erstaunlich wenig Informationen gibt es zur Biologie von Regenwurmart. Einigermaßen gut ist in Deutschland eigentlich nur *Lumbricus badensis* untersucht (LAMPARSKI 1985). Diese Daten wären aber wichtig um das Verhalten von Regenwürmern bei einem Klimawandel abschätzen zu können. Solche grundlegenden Untersuchungen sind aber vermutlich nicht Aufgabe des Landes Baden-Württemberg.

9. Literaturverzeichnis

- Albrecht, M. (1998): Vergleichende Untersuchungen der Regenwurmpopulation differenziert bewirtschafteten und genutzten Grünlandes verschiedenen Alters. Diplomarbeit Universität Hohenheim.
- Ammer, S. und F. Makeschin (1994): Auswirkungen experimenteller saurer Beregnung und Kalkung auf die Regenwurmfaua (Lumbricidae, Oligochaeta) und die Humusform in einem Fichtenaltbestand (Höglwaldexperiment). *Forstw. Cbl.* 113, 70-85.
- Atlavinyte, O. (1990). The effect of earthworms on agrocoenoses. Mokslas Publishers, Vilnius 179 S.
- Baker, S.W. und D.J. Binns (1998). Earthworm casting on golf courses: a questionnaire survey. *Journal of Turfgrass Science* 74
- Baker, G. H., Amato, M. und J. Ladd (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
- Baltzer, R. (1956): Die Regenwürmer Westfalens - eine tiergeographische, ökologische und sinnesphysiologische Untersuchung. *Zoolog. Jb.* 84, 355-414.
- Barois, I.; Villemin, G.; Lavelle, P. und F. Toutain (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.
- Barnes, B.T. und F.B. Ellis (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.
- Bauchhens J. (2007): Regenwürmer als Bioindikatoren Bodenzoologische Untersuchungen auf BDF. UBA-Texte 34/07, 21-32: Bodenbiologische Bewertung von Boden-Dauerbeobachtungsflächen (BDF) anhand von Lumbriciden.
- Belotti, E. (1997): Beeinträchtigung des Bodens als Filter und Puffer für Schadstoffe gegenüber endogäischen Regenwürmern. Abschlußbericht zum Forschungsprojekt im Auftrag der LfU Baden-Württemberg.
- Berman, D. I., Meshcheryakova, E. N., Alfimov, A. V. und A.N. Leirikh (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.
- Berry E.C. und D. Jordan (2001):Temperature and soil moisture content effects on the growth of *Lumbricus terrestris* (Oligochaeta: Lumbricidae) under laboratory conditions *Soil Biology & Biochemistry* 33 133±136
- Beylich, A. und U. Graefe (2007): Lumbriciden in der Boden-Dauerbeobachtung: Darstellung von Referenzbereichen, Baselines und Veränderungstendenzen an Beispielen aus Norddeutschland. UBA-Texte 34/07, 33-53: Bodenbiologische Bewertung von Boden-Dauerbeobachtungsflächen (BDF) anhand von Lumbriciden.
- Bieri, M. und Cuendet G. (1989). Die Regenwürmer, eine wichtige Komponente von Ökosystemen. *Schweiz. Landw. Fo.* 28, 81-96.Literaturstudie
- Blackshaw, R.P. (1995): Changes in populations of the predatory flatworm *Artioposthia triangulata* and its earthworm prey in grassland. *Acta Zoologica Fennica* 196, 107-110.
- Bohlen, P. J., Pelletier, D. M., Groffman, P. M., Fahey, T. J., und M. C. Fisk (2004): Influence of Earthworm Invasion on Redistribution and Retention of Soil Carbon and Nitrogen in Northern Temperate Forests. *Ecosystems* 7, 13-27.
- Bouche, M.B. (1977): Strategies Lombriciennes. *Ecol. Bull. ;Soil Organisms as Components oc Ecosystems* 25, 122-132.
- Bouche, M.B. (1982): zitiert nach Zusammenstellung bei Lee, K.E. (1985): Earthworms - Their ecology and relationships with soils and land use. Academic Press, Sydney.
- Clapperton, M. J., Lee, N. O., Binet, F., und R.L. Conner (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. und R.G. Sturdy (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.
- Daniel, O. (1990): Life cycle and population dynamics of the earthworm *Lumbricus terrestris* L. Dissertation, Swiss Federal Institute of Technology, Zurich.
- Daniel, O., Kohli, L., Schuler, B. und J. Zeyer (1996). Surface cast production by the earthworm *Aporrectodea nocturna* in a pre-alpine meadow in Switzerland. *Biology and Fertility of Soils* **22**, 171-178.
- Daugbjerg, P. (1988): Temperature and moisture preferences of three earthworm species (Oligochaeta, Lumbricidae). *Pedobiologia* 32, 57-64.
- Dexter, A.R. (1978): Tunnelling in soil by earthworms. *Soil Biol. & Biochem.* 10, 447-449.
- Doube, B.M. und C. Styan (1997). The response of *Aporrectodea rosea* and *Aporrectodea trapezoides* (Oligochaeta: lumbricidae) to moisture gradients in three soil types in the laboratory. *Biology and Fertility of Soils* **23**, 166-172
- Dunger, W. (1983): Tiere im Boden. Die Neue Brehm Bücherei 327, Ziemsen Verlag, Wittenberg.
- Duriez, O., Ferrand, Y., Binet, F., Corda, E., Gossmann, F. und H. Fritz (2005). Habitat selection of the Eurasian woodcock in winter in relation to earthworms availability. *Biological Conservation* **122**, 479-490.
- Edwards, C.A. und J.R. Lofty (1977): Biology of earthworms. Chapman & Hall, London; John Wiley & Sons, New York.
- 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, W.M., Shipitalo, M.J., Traina, S.J., Edwards, C.A. und L.B. Owens (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. und U. Babel (1991): Quantitative Regenwurmerfassung - ein Methodenvergleich. *Mitteilungen Dt. Bodenkundl. Gesellsch.* 66, I, 475-478.
- 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.
- Ehrmann, O. (1997): Regenwürmer bei Direktsaat, Mulch, Pflug. Projektbericht für das Ministerium für Ländlichen Raum, Ernährung, Landwirtschaft und Forsten Baden-Württemberg.
- Ehrmann, O., Sommer, M. und T. Vollmer (2002): Regenwürmer in Wäldern Baden-Württembergs: In: Sommer, M., Ehrmann, O., Friedel, J.K., Martin, K., Vollmer, T. und G. Turian: 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.
- Ehrmann, O. und A. Schwarz (2002): Regenwurmröhren in Äckern Südwestdeutschlands - Vorkommen und Bedeutung für Stofftransporte. *Mitteilungen Dt. Bodenkundl. Gesellsch.* 99, 175-176.
- Ehrmann, O. (2003a): Regenwürmer auf der Kreismülldeponie Leonberg. In: Wattendorf, P., Konold, W. & O. Ehrmann: Gestaltung von Rekultivierungsschichten und Wurzelsperren, *Culterra* 32, Freiburg, 184 S.

- Ehrmann, O (2003b): Vorkommen von anezischen Regenwürmern in zwei unterschiedlich strukturierten Kleinlandschaften Südwestdeutschlands. *Mitteilungen Dt. Bodenkundl. Gesellsch.* 102, 271-272.
- Ehrmann, O. und K.H. Feger (2006): Auswirkungen von Waldkalkungen auf Regenwürmer und Bodenstruktur. *AFZ-Der Wald*, 19/2006, 1046-1048.
- Ehrmann, O. und C. Emmerling (2007): Mögliche Auswirkungen des prognostizierten Klimawandels auf Regenwürmer. *Mitteilungen Dt. Bodenkundl. Gesellsch.* 110/1, 285-286.
- Eichinger, E., Bruckner, A. und M. Stemmer (2007). Earthworm expulsion by formalin has severe and lasting side effects on soil biota and plants. *Ecotoxicology and Environmental Safety* **67**, 260-266.
- El Duweini, A.K. und S.I. Ghabbour (1965): Population Density and Biomass of Earthworms in different types of egyption soils. *Journal of Applied Ecology* 2/2 271-287.
- Eriksen-Hamel, N. S. und J.K. Whalen (2007). Impacts of earthworms on soil nutrients and plant growth in soybean and maize agroecosystems. *Agriculture, Ecosystems & Environment* **120**, 442-448
- Evans, A.C. und W.J. McL. Guild (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.
- GEFU (1993): Integriertes Rheinprogramm: Faunistische-biologische Untersuchungen auf Dauerbeobachtungsflächen am Oberrhein. Bericht im Auftrag der LfU Baden-Württemberg.
- Gerard B.M. (1967): Factors affecting Earthworms in Pastures. *Journal of Animal Ecology* 36/1, 235-252
- 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.
- 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.
- Haima, J., Huhta, V. und M. Boucelham (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
- Haria, A.H. (1995). Hydrological and environmental impact of earthworm depletion by the New Zealand flatworm (*Artioposthia triangulata*). *Journal of Hydrology Amsterdam* **171**, 1-3.
- Holmstrup, M. und K.E. Zachariassen (1996). Physiology of cold hardiness in earthworms. *Comparative Biochemistry and Physiology* **115A**, 91-101.
- Holmstrup, M. (2001). Sensitivity of life history parameters in the earthworm *Aporrectodea caliginosa* to small changes in soil water potential. *Soil Biology and Biochemistry* **33**, 1217-1223.
- Hoogerkamp, M., Roogar, H. und H.J. Eijsackers (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. und O. Larink (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
- Khan, M. A. Q., Ahmed, S. A., Salazar, A., Gurumendi, J., Khan, A., Vargas, M. und B. Catalin (2007). Effect of temperature on heavy metal toxicity to earthworm *Lumbricus terrestris* (Annelida: Oligochaeta). *Environmental Toxicology* **22**, 487-494

- Kladivko, E.J., Akhouri, N.M., Weesies G. und C.A. Edwards (1997). Earthworm populations and species distributions under no-till and conventional tillage in Indiana and Illinois [USA]. In Edwards, C.A. (ed): *5th International symposium on earthworm ecology. Soil biology & biochemistry* **29**, 613-615
- KLIWA (2006): Regionale Klimaszenarien für Süddeutschland, Abschätzungen der Auswirkungen auf den Wasserhaushalt, Herausgegeben von Arbeitskreis KLIWA (LUBW Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg, Bayerisches Landesamt für Umwelt BfLU und Deutscher Wetterdienst DWD), KLIWA-Berichte Heft 9, 100 S.
- Kretzschmar, A. (1991): Burrowing ability of the earthworm *Aporrectodea longa* limited by soil compaction and water potential. *Biol Fertil Soils* **11**: 48-51.
- 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 Geowissenschaftliche Fakultät der Albert-Ludwig-Universität Freiburg.
- Lamparski, F., Kobel-Lamparski, A. und R. Kaffenberger (1987): The Burrows of *Lumbricus badensis* and *Lumbricus polyphemus*. In: Bonvicini Pagliai, A.M. und P. Omodeo (eds.): *On Earthworms. Collana U.Z.I., Selected Symposia and Monographs U.Z.I. 2*, Mucchi, Modena, 131-140.
- Lavelle-P, Martin-A. und A. Kretzschmar (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 relationships with soils and land use*. Academic Press, Sydney.
- Ma, W.C. Brussaard, L. und J.A. de Ridder (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. und J. Bok (1988): Earthworm-amended soil structure: Its influence on Collembola populations in grassland. *Pedobiologia* **32**, 243-252.
- Marinissen, J.C.Y. und A.R. Dexter (1990): Mechanisms of stabilization of earthworm casts and artificial casts. *Biol. Fertil. Soils* **9**, 163-167.
- Marinissen, J.C.Y. und F. van den Bosch (1992): Colonization of new habitats by earthworms. *Oecologia* **91**, 371-376.
- 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. und O. Christensen (1988): Surface movements of earthworms in agricultural land. *Pedobiologia* **32**, 399-405.
- Mather, J.G. und O. Christensen (1993): the exotic land planarian *Artioposthia triangulata* in the Faroe Islands: colonisation and habitats. *Frodskaparit* **40**, 49-60.
- Nielsen, G.A. und F.D. Hole (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.
- Nordström, S. (1975): Seasonal activity of lumbricids in southern Sweden. *Oikos* **26**, 307-315.
- Nordström, S. und S. Rundgren (1974): Environmental factors and lumbricid associations in southern Sweden. *Pedobiologia* **14**, 1-27.

- Penev L.D., Vasilev A.I., Golovatch-SI und E.S. Kvakvadze (1994). Variation in indices of diversity of earthworms (Oligochaeta, Lumbricidae) in the oak forests of the Russian plain in relation to environmental factors. *Zoologicheskii Zhurnal* **73**, 14-21 (Es stand nur das Abstract zur Verfügung)
- Sanchez, E.G., Munoz B., Garvin M.H., Jesus J.B. und D.J. Diaz-Cosin (1997): Ecological Preferences of some Earthworm Species in Southwest Spain *Soil Biol. Biochem.* **29**, 313-316
- 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.
- SCHULZ, E. und O. GRAFF (1977): Zur Bewertung von Regenwurmmehl aus *Eisenia foetida* als Eiweißfuttermittel. - *Landbauforsch. Völkenrode* **27**, 216-218.
- Sharpley, A.N. Syers, J.K. und J.A. Springett (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. und S. Pawluk (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:
 Menschen: www.statistik-bw.de/BevoelkGebiet/Landesdaten/geb00.asp
 Rinder: www.stala.bwl.de/Pressemitt/2008218.asp
 Schweine: www.stala.bwl.de/Pressemitt/2008227.asp
- Statistisches Landesamt Baden-Württemberg 2008b:
www.statistik-bw.de/Landwirtschaft/Landesdaten/LRt0702.asp
- Stein, A., Bekker, R.M., Blom, J.H.C. und H. Rogaar (1992): Spatial variability of earthworm populations in a permanent polder grassland. *Biol. Fert. Soils* **14**, 260-266.
- Stephens, P.M., Davoren C.W. und C.A. Edwards (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.
- Tischer, S. (2007): Erfassung und Bewertung von Lumbricidenvorkommen sowie deren Schwermetallgehalte auf BDF von Sachsen-Anhalt und Thüringen UBA-Texte 34/07, 54-71: Bodenbiologische Bewertung von Boden-Dauerbeobachtungsflächen (BDF) anhand von Lumbriciden.
- Thonon, I. und C. Klok (2007). Impact of a changed inundation regime caused by climate change and floodplain rehabilitation on population viability of earthworms in a lower River Rhine floodplain. *Science of The Total Environment* **372**, 585-594.
- Vollmer, T. (1999): Die Regenwurmfaua naturnaher Waldökosysteme Südwestdeutschlands und ihre Abhängigkeit von Standortfaktoren. Diplomarbeit, 130 S. Institut für Bodenkunde und Standortslehre der Universität Hohenheim, Stuttgart.
- WaBoA (2007): Wasser- und Bodenatlas Baden-Württemberg. Herausgeber Umweltministerium Baden-Württemberg und Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg.
- Wilcke, D. E. (1953): Über die vertikale Verteilung der Lumbriciden im Boden. *Z. Morph. u. Ökol. Tiere* **41**, 372-385.
- Zaller G.J. und J.A. Arnone (1997). Activity of surface-casting earthworms in a calcareous grassland under elevated atmospheric CO₂. *Oecologia* **111**, 249-254