Regenwürmer – vielseitige Bodeningenieure mit Nutzen für Bäume

Earthworms – versatile soil engineers with benefits for trees

von Michael Müller-Inkmann

Zusammenfassung

Regenwürmer haben positive Auswirkungen auf den Wurzellebensraum, da durch ihre Grabaktivität eine Bodenstruktur mit günstigen Luft-, Wasser- und Nährstoffverhältnissen geschaffen wird. Die Anwesenheit dieser Ökosystemingenieure deutet somit auf einen guten Bodenzustand für Bäume hin. Trotz ihrer Bedeutung werden Regenwürmer von Baumverantwortlichen oftmals wenig beachtet. Daher wird allgemein über Regenwürmer informiert und insbesondere auf Lebensweisen, Körperbau und Grabverhalten eingegangen. Es werden Verfahren zur Erfassung von Regenwürmern vorgestellt und an der Bodenoberfläche sichtbare Wurmspuren beschrieben. Außerdem werden Hinweise zur Regenwurmansiedlung am Baumstandort gegeben und bekannte Methoden zur Regenwurmausbringung benannt.

Summary

Earthworms have positive effects on the habitat of roots, because their burrowing activity creates a soil structure with beneficial conditions regarding soil air, soil water and nutrient supply. The presence of these ecosystem engineers therefore indicates favorable soil conditions for trees. Despite their importance, earthworms often receive little attention by arborists. Therefore, this text informs about the life of these invertebrates and in particular their anatomy, burrowing behavior and reproduction are discussed. Methods for evaluation of earthworms numbers are presented and typical worm traces on the soil surface are described. Furthermore, information on increasing earthworm populations at the tree site are named.

1 Einleitung

Anfang des 19. Jahrhunderts galten Regenwürmer als bodenbürtige Pflanzenschädlinge, welche scharf bekämpft wurden (Graff 1979). Insbesondere durch die Arbeit des englischen Naturforschers Charles Darwin sollte sich diese Sichtweise ändern. Sein von Wissenschaftlern als Gründungswerk der Bodenbiologie gewürdigtes Buch „Die Bildung der Ackererde durch die Thätigkeit der Würmer mit Beobachtungen über deren Lebensweise“ erschien im englischen Original 1882 (Darwin 1882). Das „Regenwurmbuch“ beinhaltete Darwins langjährige Beobachtungen und war ein Bestseller seiner Zeit. Darwins Werk gilt als historischer Wendepunkt zur Wahrnehmung der Bedeutung von Regenwürmern: vom bodenbürtigen Schädling zum Nützling (Brown et al. 2003).

Seither wurde der Nutzen von Regenwürmern für das Ökosystem in zahlreichen wissenschaftlichen Arbeiten bestätigt (u. a. Blouin et al. 2013). Am Baumstandort muss die Anwesenheit von Regenwürmern positiv bewertet werden, denn ihre Aktivität hat stets günstige Auswirkungen auf den Wurzellebensraum von Bäumen. Nachfolgend wird themenweise informiert, um einen Beitrag zur Verbesserung der Kenntnis über Regenwürmer bei Baumverantwortlichen zu leisten.

2 Kleine Regenwurmkunde

2.1 Namensgebung

Die überwiegende Zeit ihres Lebens verbringen Regenwürmer in der Erde. Daher würden Regenwürmer treffender als „Erdwürmer" bezeichnet, wie es z. B. bei den Briten (*earthworm*) üblich ist. Die genaue Herkunft der Bezeichnung „Regenwurm" ist sehr umstritten und kann nicht mehr eindeutig geklärt werden. Die Namensgebung kann darauf zurückgeführt werden, dass der Regenwurm im Volksmund als „reger Wurm" bezeichnet wurde (Buch 1986). Daraus soll sich im Laufe der Zeit der Begriff „Regenwurm" entwickelt haben. Andere Autoren gehen davon aus, dass das massenhafte aus dem Boden kommen der Würmer nach Regenfällen namensgebend sei (RUBZ 2000).

2.2 Regenwurmarten

Ein weit verbreiteter Irrglaube ist, dass es nur „den" Regenwurm gibt. Tatsächlich ist der Name Regenwurm ein Sammelausdruck für zahlreiche Arten. Allein in Deutschland sind 47 etablierte Arten bekannt (Lehmitz et al. 2016), die oftmals nur mit speziellen Bestimmungsschlüsseln fehlerfrei zu benennen sind (u. a. Christian & Zicsi 1999; Krück 2018). Allerdings ist diese vermeintliche Artenfülle trügerisch, da einige Arten sehr selten oder nur kleinräumig vorkommen. Somit ist in vielen Gebieten mit einer erheblich geringeren Artenanzahl zu rechnen.

Der bekannteste Regenwurm ist der Tauwurm (*Lumbricus terrestris*), ein bei Anglern beliebter Köder, dessen abgeplattetes Hinterende typisch ist. Als seine einheimischen Verwandten können der Braune Laubfresser (*Lumbricus castaneus*) und der Rote Laubfresser (*Lumbricus rubellus*) angesehen werden (Abbildung 1). Bei beiden ist die jeweilige Färbung (*castaneus* = kastanienfarbig, *rubellus* = rot) und ihre Lebensweise als Streubewohner namensgebend. Weitverbreitet und sehr unauffällig ist der Grauwurm (*Aporrectodea caliginosa*), welcher eine enorme Grabaktivität im Mineralboden aufweist. Ebenfalls sehr häufig anzutreffen ist der Schleimwurm (*Aporrectodea rosea*), der

Tabelle 1: Lebensformtypen von adulten Regenwürmern in der Übersicht (Fründ 2010, verändert)

Lebensformtyp	Phänotyp adulter Tiere	Lebensweise
Streubewohner (epigäisch)	klein bis mittelgroß, dunkel gefärbt, Körperinhalt nicht sichtbar (Abbildung 1)	zu finden in der Mulch- oder Streuschicht, ernähren sich von verrottenden Pflanzenresten, vielfach geringe Grabaktivität, Besonderheit: kortikole Arten auf Bäumen oder Totholz
Mineralbodenbewohner (endogäisch)	überwiegend mittelgroß, grau bis rosa gefärbt, Körperinhalt sichtbar (Abbildung 2)	graben meist horizontale Gänge im Mineralboden, Gänge oft mit Losung verfüllt, in der Nähe von Pflanzenwurzeln zu finden, Ernährung durch organische Substanz, welche mit dem Boden beim Fressen aufgenommen wird, Gänge nicht dauerhaft
Tiefgräber (anecisch)	große Würmer mit dunkel gefärbtem Vorderteil und hellerem Hinterkörper (Abbildung 3)	graben meist vertikale und dauerhafte Gänge mit Öffnung zur Oberfläche im Mineralboden (mehrere Meter tief), Ernährung durch Pflanzenreste von der Bodenoberfläche, welche in die Gänge gezogen werden, Gänge mit Losung tapeziert
Kompostwürmer	kleine bis mittelgroße Würmer, Segmentgrenzen beim gestreckten Tier als helle Ringe sichtbar, teilweise gelblich	in intensiv verrottendem organischen Material (u. a. Komposthaufen), extrem hohe Vermehrungsrate (oft als Massenansammlung), im Mineralboden nicht vorkommend

Jahrbuch der Baumpflege 2020, 24. Jg., S. 181–194, ISBN 978–3–87815–270–5

auf Berührung sein Kopfende leicht birnenförmig einzieht (Krück 2018). Neben dem Tauwurm gehört der Große Wiesenwurm (*Aporrectodea longa*) zu den tiefgrabenden einheimischen Regenwurmarten – beide können mehrere Meter tiefe Gänge anlegen (Graff 1983). Auf zahlreichen Standorten mit ausreichender Bodenfeuchte kann häufig der Kleine Ackerwurm (*Aporrectodea chlorotica*) angetroffen werden. Im Vergleich zu allen anderen einheimischen Regenwurmarten rollt er sich bei Berührung zunächst ein und kann sich blitzschnell eingraben (Meinhardt 1986). Der größte Regenwurm in Deutschland ist der „Badische Riesenregenwurm" (*Lumbricus badensis*). Er lebt im Schwarzwald und wird bis zu 60 cm lang (Kobel-Lamparski & Lamparski 2004). Einen ungewöhnlichen Anblick bietet der smaragdgrüne Regenwurm (*Aporrectodea smaragdina*), welcher sich durch seine Färbung deutlich von seinen Artgenossen abhebt.

Eine Besonderheit sind die kortikolen Regenwürmer (Rindenbewohner), welche an lebenden Bäumen oder Totholz vorkommen. Dem ein oder anderen sind sie vermutlich schon im Mulm alter Bäume begegnet. Ein typischer Vertreter ist *Allolobophoridella eiseni*, welcher am ehesten an Bäumen klettert (Römbke et al. 2012) und gerade in Buchen- und Eichenwäldern Deutschlands häufig anzutreffen ist (Römbke et al. 2017).

Grundsätzlich können Regenwürmer nach ihrer Lebensweise einer ökologischen Gruppe (sog. Lebensformtyp) zugeordnet werden (Tabelle 1). Dabei sind die adulten Regenwürmer schnell entsprechend ihres Erscheinungsbildes zuordenbar. Bei juvenilen Regenwürmern kommt es oftmals vor, dass trotz ihres für einen Lebensformtyp charakteristischen Aussehens eine andere Verhaltensweise auftritt. Somit wechselt bei manchen Regenwurmarten der Lebensformtyp im Laufe des Lebens, was eine klare Abgrenzung erschwert.

2.3 Körperbau und Fortbewegung

Betrachtet man einen Regenwurm, so scheint sein Körper aus einer Vielzahl aneinandergereihter Scheiben zu bestehen (sog. Segmente). Die äußerlich als Körperringel sichtbaren Segmente weisen immer vier Borsten-

Abbildung 1: Typisch für den epigäisch lebenden Roten Laubfresser *(Lumbricus rubellus)* ist seine rotbraune Färbung.

Abbildung 2: Ein endogäischer Regenwurm mit deutlich sichtbarem Körperinhalt.

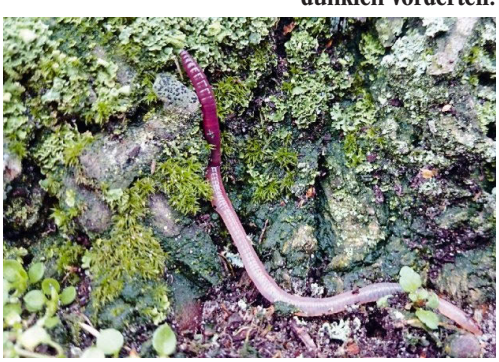

Abbildung 3: Ein anecischer Regenwurm, deutlich erkennbar an seinem dunklen Vorderteil.

paare auf, mit Ausnahme des ersten Segmentes, dort befindet sich der Kopf. Mithilfe der Borsten können sich die Würmer beim Bewegen festhalten. Wird ein Wurm für kurze Zeit auf trockenes Filterpapier ausgesetzt, kann man sogar das beim Kriechen von den Borsten verursachte „Geraschel" wahrnehmen (Peters & Walldorf 1986). Bei fortpflanzungsreifen Regenwürmern befindet sich im vorderen Drittel des Wurmkörpers eine deutliche Anschwellung der Haut (sog. Clitellum). Bei der Paarung, der Kokonbildung und als Bestimmungsmerkmal spielt das Clitellum eine wichtige Rolle.

Ihre „Stabilität" erhalten Regenwürmer durch die im Haut-Muskel-Schlauch unter Druck stehende Körperflüssigkeit – so wie bei einem prall gefüllten Gartenschlauch. Schließlich bestehen Regenwürmer zu 80–90 % aus Wasser (Graff 1983). Die Fortbewegung des Regenwurms erfolgt durch das abwechselnde Strecken und Zusammenziehen von Ring- und Längsmuskulatur. Die beiden Muskelarten sind nahezu entspannt, wenn der Wurm ruhig daliegt. Bei der Fortbewegung streckt er zuerst sein Vorderende und schiebt es damit in Kriechrichtung. Danach verkürzt er das Vorderende und zieht das Hinterende lang. Letztlich verkürzt er das Hinterende und zieht es vollständig nach – dann beginnt der Ablauf von vorn (Abbildung 4).

Wenn Regenwürmer neue Gänge im lockeren Boden anlegen, ziehen sie die Ringmuskeln im Körpervorderteil zusammen und stecken das dünne Vorderende in den Boden. Dann benutzen sie die Längsmuskeln und schieben mit dem sich verdickenden Vorderende das Bodenmaterial auseinander. Sie können sich somit durch das Wechselspiel von Einschieben und Verdrängen einbohren. Die auf den umgebenden Boden ausgeübten Drücke unterscheiden sich zwischen den Lebensformtypen. Keudel & Schrader (1999) berichten von radialen Drücken in folgender Abfolge: epigäisch (39–63 kPa), anecisch (72–93 kPa) und endogäisch (59–195 kPa). Die axialen Drücke zeigten eine andere Reihenfolge: epigäisch (14–25 kPa), endogäisch (27–39 kPa) und anecisch (46–65 kPa) – ein Druck von 100 kPa entspricht 1 bar. Aus den Ergebnissen kann abgeleitet werden, dass der radiale Druck der wichtigste Druck in Bezug auf die Grabaktivität von Regenwürmern ist und eine Anpassung an den jeweiligen Lebensraum stattgefunden hat.

Gelingt das Verdrängen des Bodens aufgrund einer zu starken Dichtlagerung nicht, fressen sich die Würmer hindurch. Besser noch könnte man von einem „durch den Boden lutschen" sprechen, denn Regenwürmer haben keine Zähne. Dabei sind die Tiere in der Lage, erheblich verdichtete Böden zu fressen (Joschko et al. 1989). In eigenen Laborversuchen wurden selbst Bodenblöcke mit einer hohen Lagerungsdichte von 1,7 g/cm^{-3} erschlossen (Müller-Inkmann et al. 2013).

Außerdem kann bei manchen Regenwürmern eine blitzartige Fluchtreaktion beobachtet werden, wenn man die Tiere am Vorderende berührt. Dieser Zuckreflex ist in der Natur überlebenswichtig, sofern ein Fressfeind attackiert. Befindet der Wurm sich mehr oder weniger weit mit seinem Hinterende im Gang, kann dieser schnelle Rückzug des Vorderendes aus dem Gefahrenbereich sein Leben retten. Realisiert wird diese schnelle Fluchtbewegung durch das gleichzeitige Zusammenziehen aller Längsmuskeln und kann insbesondere bei anecischen Arten beobachtet werden.

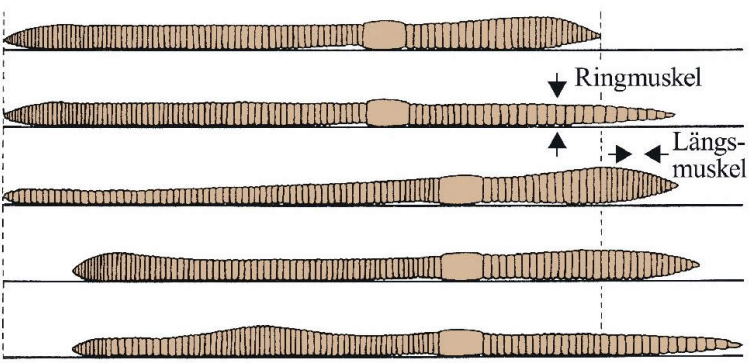

Abbildung 4: Kriechbewegung der Regenwürmer (Baatz et al. 1996)

Jahrbuch der Baumpflege 2020, 24. Jg., S. 181–194, ISBN 978–3–87815–270–5

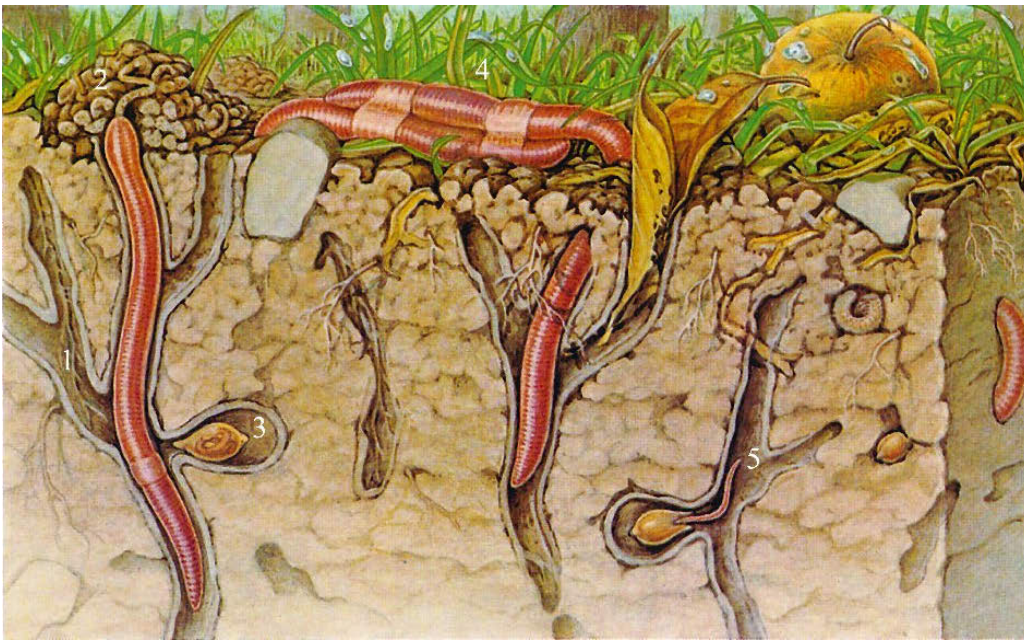

Abbildung 5: Regenwürmer und ihr Lebensraum am Beispiel des anecisch lebenden Tauwurms *(Lumbricus terrestris)*, Legende: 1 = mit Losung ausgekleideter Gang und Wurzeleinwuchs, 2 = Losungshaufen, 3 = Kokon, 4 = zwei Tauwürmer bei der Paarung, 5 = schlüpfender Tauwurm (Baatz et al. 1996)

2.4 Fortpflanzung

Alle Regenwürmer sind Zwitter und besitzen sowohl männliche als auch weibliche Geschlechtsorgane. Zur Paarung suchen sie sich einen Partner und legen sich in entgegengesetzter Richtung mit den Bauchseiten zur Begattung aneinander (Abbildung 5). In Ausnahmefällen kann es bei manchen Arten sogar zu einer Selbstbefruchtung kommen (Graff 1983). Bevor sich ein Regenwurm aber vermehren kann, muss das einzelne Tier seine Geschlechtsreife erreichen. Diese erkennt man eindeutig am ausgebildeten Clitellum.

Nach der relativ komplizierten Übertragung der Samenzellen, bei der beide Partner sowohl als Weibchen als auch Männchen aktiv werden, trennen sich die Tiere. Im Bereich des Clitellums wird eine pergamentartige Hülle ausgebildet, welche den Regenwurm wie ein breiter Ring umgibt. Diese Hülle wird kopfüber abgestreift und währenddessen werden in die Hülle Eier, Spermien und Dotter abgegeben. Die abgestreifte Hülle zieht sich am Vorder- und Hinterende zu. Im derart entstandenen Kokon erfolgt die eigentliche Befruchtung der Eizellen.

Bei den einzelnen Regenwurmarten sind die Kokons unterschiedlich in Größe, Form und Farbe ausgeprägt – sie ähneln in der Form einer Zitrone (Abbildung 5). Die Kokons werden bevorzugt in Bereiche mit günstigen Lebensbedingungen abgelegt, insbesondere in feuchte Bodenzonen. Aus einem Kokon schlüpfen artspezifisch und temperaturabhängig innerhalb von 10–20 Wochen ein oder mehrere Nachkommen (Dunger 2008).

Eine feste Paarungszeit gibt es bei Regenwürmern nicht. Sobald die Temperatur- und Feuchtigkeitsverhältnisse günstig sind, erfolgt die Paarung. Die meisten Arten paaren sich im Boden, weshalb man den Paarungsakt selbst eher selten beobachten kann (Füller 1954). Eine Ausnahme davon sind geschlechtsreife Tauwürmer, welche an der Bodenoberfläche mit ihrem Vorderende einen paarungswilligen Partner suchen, ohne dabei ihren Gang ganz zu verlassen (Abbildung 5).

2.5 Mythen über Regenwürmer

Leben halbierte Regenwürmer weiter?
Regenwürmer weisen ein beachtliches Regenerationsvermögen auf. In einer Gefahrensituation kann eine Reihe von den Segmenten am Hinterende des Wurms abgeschnürt und dem Räuber zum Fressen überlassen werden, während sich das Vorderteil in Sicherheit bringt. Das Hinterende kann nach Verlust wieder ausgebildet werden. Vorderseitig befinden sich die Mundöffnung, das „Gehirn" und eine Konzentration zahlreicher Nervenzellen. Eine Regeneration mit intaktem Vorderteil ist möglich, wenngleich viele verletzte Regenwürmer an einer Wundinfektion sterben dürften. Dass zwei lebende Würmer entstehen, wenn man einen Wurm in der Mitte durchtrennt, ist allerdings ein hartnäckiger Mythos.

Flüchten Regenwürmer vor Regenwasser?
Regenwürmer können bei Regenfällen in großer Anzahl auf der Bodenoberfläche gefunden werden – ein wahres Festessen für Amseln. Für dieses plötzliche Auskriechen existieren verschiedene Erklärungen, wenngleich die tatsächliche Ursache für diese Reaktion vermutlich ein Geheimnis der Regenwürmer bleibt.

Nach Graff (1983) können dazu mehrere Erklärungen herangezogen werden. Eine Theorie besagt, dass die Stabilität der Gänge durch das aufweichend wirkende Wasser erheblich abnimmt und die Würmer keinen ausreichenden Halt mehr finden. Die Tiere flüchten dann in Panik aus den „kollabierenden" Gängen. Eine andere Ursache soll sein, dass Regenwürmer die prasselnden Regentropfen als Erschütterung wahrnehmen und vor dem diese Erschütterung vermeintlich auslösenden Fressfeind (Maulwurf) flüchten. Durch Bodenerschütterungen im Bereich des Infraschalls werden Regenwürmer sogar so stark in Erregung versetzt, dass sie an die Bodenoberfläche kommen. Dies machen sich einige Angler zur Ködergewinnung zunutze, indem sie einen in der Erde steckenden Stock in Schwingung versetzen und die so ausgetriebenen Tiere einfangen. Ferner kann das Sickerwasser schnell die Regenwurmgänge füllen und infolge der Atmung des Bodenlebens soll es zu einer raschen Sauerstoffarmut im gestauten Bodenwasser kommen. Die Würmer verlassen dann fluchtartig das Gangsystem, um dem Erstickungstod zu entgehen.

Abbildung 6: Ein juveniler Regenwurm überdauert im Ruhezustand (Quieszenz) den trockenen Sommer 2019.

Wahrscheinlicher ist, dass Regenwürmer die günstigen Bedingungen an der Bodenoberfläche zur Wanderung und Partnersuche nutzen. Schließlich sind sie auf ausreichende Feuchtigkeitsverhältnisse an der Bodenoberfläche angewiesen und verlassen den schützenden Boden nur bei Dunkelheit, hoher Luftfeuchtigkeit oder eben bei Regen (Dunger 2008). Dass Regenwürmer feuchtigkeitsbedürftig sind, zeigt sich auch an ihrem Verhalten bei einer Trockenphase. Dann können zahlreiche Arten in einen Ruhezustand (Quieszenz) übergehen (Meinhardt 1986). Dazu graben sich die Tiere einen Hohlraum, kleiden die Wandung mit Losung aus und entleeren ihren Darm vollständig. In dieser schützenden „Kapsel" überdauern die Tiere zu einem Knäuel eingerollt und werden erst wieder bei besseren Bodenverhältnissen aktiv (Abbildung 6). Die anecischen Arten hingegen ziehen sich oftmals in tiefer gelegene, feuchtere Bodenzonen zurück und überdauern so trockene Phasen.

Ertrinken Regenwürmer in Pfützen?
Anders als viele andere Tiere haben Regenwürmer keine Lunge oder gar Kiemen und müssen den im Wasserfilm auf ihrem Körper gelösten Sauerstoff zur Atmung nutzen – sie atmen ausschließlich über die Haut. Somit können Regenwürmer nicht ertrinken, es sei denn, im „Pfützenwasser" sinkt der Sauerstoffgehalt auf ein zu geringes Niveau. Selbst eine Hälterung in kaltem, sauerstoffreichen Wasser ist mehrere Wochen lang realisierbar (Dunger 2008). Sogar eine „Wasserkur" ist möglich, bei der sich die Tiere in sauerstoffreichem

Jahrbuch der Baumpflege 2020, 24. Jg., S. 181–194, ISBN 978–3–87815–270–5

und kalten Wasser sichtlich erholen. Abgesehen von einem letalen Sauerstoffgehalt können Regenwürmer im warmen Wasser einer Pfütze auch den Hitzetod erleiden oder werden leicht zur Beute eines Fressfeindes.

3 Bedeutung der Regenwürmer am Baumstandort

Regenwürmer wirken auf mannigfaltige Weise auf den Boden ein und gelten als bedeutsame „Ökosystemingenieure" des Bodens (Jiménez et al. 2001). Dabei werden die wesentlichen Auswirkungen im Wurzelbereich durch die Grabaktivität von endogäischen und anecischen Regenwürmern im Mineralboden erreicht. Epigäischen Regenwürmern kommt eine untergeordnete Rolle hinsichtlich des Nutzens für Bäume zu – zumindest solange das als Nahrungsgrundlage nötige Laub nur selten im Kronentraufbereich verbleibt. Auch die Kompostwürmer können i. d. R. nicht positiv auf Bäume einwirken. Daher wird im Folgenden ausschließlich auf die Aktivität der den Mineralboden bewohnenden (endogäischen und anecischen) Regenwurmarten eingegangen.

Diese Regenwürmer ernähren sich hauptsächlich von unterschiedlich stark zersetzter organischer Substanz und nehmen beim Fressen des Bodens auch lebende Organismen auf (Curry & Schmidt 2007). Im Darmtrakt werden organische und mineralische Bestandteile fest miteinander verbunden. Dabei entstehen organomineralische Verbindungen (Ton-Humus-Komplexe), durch die die Stabilität der Böden erheblich erhöht wird. Derartige Aggregate wiederstehen Druckeinwirkungen und Erosion, wenn alle anderen Bodenaggregate unter gleichem Einfluss bereits zerstört sind (Topp 1981). Ferner sind Ton-Humus-Komplexe Voraussetzung für den Aufbau stabiler Bodenkrümel, welche zusammen mit den Regenwurmgängen für Pflanzen günstige Luft-, Wasser- und Nährstoffverhältnisse schaffen (Kavdir & İlay 2011). Außerdem wird die Gesamtmenge der Pflanzennährstoffe des gefressenen Bodens in der Losung pflanzenverfügbar konzentriert, weshalb Regenwurmlosung auch als Dünger eingesetzt werden kann (Minnich 1977).

Es werden lediglich 5–10 % der Nahrung absorbiert und zum Wachstum sowie für den Metabolismus verwendet (Tajbakhsh et al. 2011). Somit müssen Regenwürmer relativ große Bodenmengen fressen, um ihren Nahrungsbedarf zu decken und bearbeiten dabei unentwegt den Boden. Je nach Regenwurmart wird dabei ein mehr oder weniger umfangreiches Gangsystem angelegt (Abbildung 7). Endogäische Arten schaffen ein horizontales Gangsystem, welches sich meistens im humosen Oberboden befindet. Das Gangsystem dieser Arten ist nicht von langer Dauer. Die alten Gänge werden mit Losung verfüllt und unentwegt neu gegraben. Die Tiefgräber (anecische) hingegen legen dauerhafte und vertikal verlaufende Röhren an, welche tief in den Unterboden reichen. Diese Gänge sind dauerhaft bewohnt und sehr stabil, was insbesondere an der sogenannten Losungstapete liegt. Diese Tapete entsteht, indem der Wurm die Wohnröhre ringsum mit Losung auskleidet (Graff 1983). Darüber hinaus arbeiten die Tiefgräber die Streu nahezu vollständig in den Boden ein und sorgen damit für einen natürlichen Eintrag der organisch gebundenen Nährstoffe (Bieri & Cuendet 1989).

Im Regenwurmgang profitieren Baumwurzeln von einem oftmals ungehinderten Gasaustausch, bei dem Sauerstoff aus der Atmosphäre in den Boden gelangt und das toxische Kohlenstoffdioxid aus dem Boden abtransportiert wird. Die Folge ist eine für Baumwurzeln günstige Bodenluft. Schließlich reagieren Bäume auf Belüftungsstörungen mit einer nachlassenden Feinwurzelbildung, wodurch der Baum immer weniger

Abbildung 7: Ein Tauwurm (*Lumbricus terrestris*) zeigt im Laborversuch, dass er im Boden röhrenförmige Grobporen schaffen kann.

ausreichend mit Wasser und Nährelementen versorgt wird (Weltecke & Gaertig 2012).

Außerdem wirkt ein von Regenwürmern durchmischter und durchlöcherter Boden wie ein Schwamm (Hansche 1988), in dem Wasser pflanzenverfügbar vorgehalten wird. Die Regenwurmgänge erhöhen die Infiltration, wodurch Regenwasser ungehindert und relativ tief in den Boden gelangt. Dieses ist insbesondere bei Starkregenereignissen von Interesse und verbessert allgemein die Wasserversorgung am Baumstandort. Aufgrund der günstigen Wuchsbedingungen wachsen Wurzeln bevorzugt in die Regenwurmgänge ein (Graff 1983), weshalb man diese Gänge auch als „Wurzelautobahnen“ bezeichnen könnte. Außerdem wird der Wurzelraum durch Gänge erweitert, indem der Zugang zu tieferen Bodenschichten ermöglicht wird, oder verdichtete Bereiche werden durchbrochen (Abbildung 8). Zahlreiche Untersuchungen belegen, dass Regenwürmer verdichtete Bodenbereiche lockern können (Joschko et al. 1989; Larink & Schrader 2000; Capowiez et al. 2009; Müller-Inkmann et al. 2013). Das Potenzial zur Bodenlockerung kann gut anhand verdichteter Bodenblöcke dargestellt werden, welche in einen biologisch aktiven Standort eingebracht werden (Abbildung 9). Nach mehreren Wochen Exposition inner-

Abbildung 8: Selbst in verdichteten Bodenzonen zeigen sich oftmals zahlreiche Gänge der Tiefgräber, wie hier bei einer punktuell durchbrochenen Pflugsohle.

Abbildung 9: Künstlich verdichteter Bodenblock (Durchmesser 15 cm, Höhe 4 cm) in einem Gitterkorb vor dem Eingraben auf einer Rasenfläche mit hoher Regenwurmdichte

Jahrbuch der Baumpflege 2020, 24. Jg., S. 181–194, ISBN 978–3–87815–270–5

halb der Vegetationszeit können im gebrochenen Bodenblock bereits zahlreiche Spuren der Grabaktivität festgestellt werden (Abbildung 10).

Letztlich leisten Regenwürmer durch ihre Ernährungsgewohnheiten und ihre Fähigkeit, Gänge anzulegen, einen vielfältigen Beitrag zur Verbesserung der Bodenstruktur bzw. des Wurzellebensraumes von Bäumen, indem ein biologisch gelockerter Boden mit hoher Fruchtbarkeit entstehen kann.

Abbildung 10: Die Lockerungswirkung der Regenwürmer wird deutlich, wenn sie einen künstlich verdichteten Bodenblock erschließen. Neben den Gängen und einzelnen Tieren erkennt man deutlich die dunkle Einmischung des anstehenden Bodens.

4 Regenwurmspuren und Fangmethoden

Am Baumstandort können mehrere Verfahren zur Erfassung von Regenwürmern durchgeführt werden. Dabei kann man sich zunächst einen Überblick über das Vorkommen von Regenwürmern verschaffen, da typische Spuren an der Bodenoberfläche sichtbar sind. Als Regenwurmspuren können neben den Tieren selbst Losungshaufen, Streuhaufen (sog. Middens), Gangöffnungen oder Kriechspuren entdeckt werden. Das Vorhandensein von Losungshaufen ist ein sicherer Hinweis auf eine Regenwurmbesiedlung (Abbildung 11). Ebenso zeigen Middens deutlich die Präsenz einer anecischen Art an, denn diese Regenwürmer ziehen die Streu zu kleinen Häufchen an der Mündung ihrer Wohnröhre zusammen. Unter günstigen Bedingungen (feuchte Witterung bei feinkörnigen Böden ohne Aufwuchs) findet man sogar Kriechspuren an der Oberfläche.

Allerdings kann aus dem Fehlen der entsprechenden Spuren nicht auf das Fehlen von Regenwürmern geschlossen werden. Schließlich sind die Wurmspuren nicht ganzjährig gleich gut sichtbar. Oft ist die Regenwurmspurensuche ergebnislos, da sie durch Wassererosion oder Trittbelastung abgetragen wurde. Ferner sind viele Arten gerade im Sommer bei stärkerer Trockenheit inaktiv und es entstehen keine neuen Spuren.

Nachdem man sich einen ersten Eindruck an der Bodenoberfläche verschafft hat, kann die genaue Artenzusammensetzung und die Regenwurmdichte (Anzahl

Abbildung 11: Zahlreiche Losungshaufen am Baumstandort weisen auf günstige Standorteigenschaften hin.

der Würmer pro Quadratmeter) eine vertiefte Aussage über den am Baumstandort vorhandenen Regenwurmbestand liefern. Hierzu sind mehrere Fangmethoden bekannt, welche sich in Anwendung und Effizienz unterscheiden (Tabelle 2). Der Regenwurmfang ist bei sehr trockenem, sehr nassem oder kaltem Boden (< 5° C) nicht sinnvoll (Ehrmann et al. 2006).

Bei der Handauslese werden Bodenproben mit einem Spaten ausgehoben und zur händischen Durchsicht nach Regenwürmern auf einer weißen Plane verteilt. Zum Elektrofang wird ein spezielles Gerät benötigt, bei dem oftmals über acht Elektroden ein elektrisches Feld erzeugt wird (Oktett-Methode), in dessen Bereich die Tiere an die Bodenoberfläche kommen. Ferner ist die Austreibung mittels verschiedener Reizlösungen möglich. Hierbei sind Formalin und Allylisothiocyanat die bekanntesten Reizmittel, wenngleich zahlreiche andere geeignet sein können. Um die Reizwirkung auf die Tiere zu unterbinden, müssen diese nach dem Austreiben unverzüglich in ein Gefäß mit Wasser gegeben werden.

Die Kombination der Handauslese mit einer der drei anderen Methoden bringt oftmals die besten Ergebnisse, sofern am Standort eine Grabung möglich ist. Wer sich vertieft mit den Methoden beschäftigen möchte, findet ausführliche Informationen bei Ehrmann & Babel (1991), Zaborski (2003) sowie Fründ & Jordan (2004).

Zur kurzfristigen Aufbewahrung der gefangenen Tiere sollten Behälter mit fein gesiebtem Boden vom Fundort gefüllt werden. Die Behälter sind bestenfalls dunkel und kühl (5–10° C) zu lagern und ihr Inhalt sollte gleichmäßig feucht gehalten werden. So gewinnt man Zeit, wenn man die gesammelten Arten erst später bestimmen möchte. Die Artbestimmung lebender Tiere ist selbst für erfahrene Personen schwierig, da sich die Regenwürmer oftmals stark bewegen. Eine relativ schonende Möglichkeit zur Ruhigstellung ist die kurzzeitige Überführung in kaltes, kohlensäurehaltiges Mineralwasser (< 100 sek.). Die Würmer werden darin bewusstlos und können mit einer Lupe (10fach) oder besser unter einem Binokular bestimmt werden. Nach der Überführung in kühles und sauerstoffreiches Wasser erholen sich die Tiere. In wissenschaftlichen Untersuchungen werden Regenwürmer üblicherweise nach dem Fang in 4 % Formalin oder 70 % Ethanol abgetötet und konserviert (Ehrmann et al. 2006).

5 Regenwurmansiedlung an Baumstandorten

Vor jeder Baumstandortsanierung muss eine sachverständige Standort- und Baumansprache durchgeführt werden. Im Rahmen dieser Untersuchung wird die Entscheidung getroffen, ob Regenwürmer vor Ort gefördert oder neue Tiere angesiedelt werden sollen. Die

Tabelle 2: Vergleich ausgewählter Fangmethoden (Ehrmann et al. 2006, verändert)

	Effektivität bei verschiedenen Lebensformtypen			Weitere Vor- und Nachteile
	epigäische	endogäische	anecische	
Handauslese	+	++	-	zeitaufwendig, Effektivität auch von Bearbeiter abhängig
Elektrofang	++	+/-	juvenile: ++ adulte: +/-	hoher apparativer Aufwand, gut geeignet für Methodenkombination
Formalin-Austreibung	+	-	++	standardisierte Rezeptur, schädlich für Regenwürmer und andere Bodenorganismen (ökotoxische Substanz!)
AITC-Austreibung	+	-	++	Effektivität vergleichbar mit Formalin, aber keine oder geringe toxische Wirkung

++ = sehr gut geeignet, + = gut geeignet, - wenig geeignet, +/- = situationsweise verschieden, AITC = Allylisothiocyanat

Jahrbuch der Baumpflege 2020, 24. Jg., S. 181–194, ISBN 978–3–87815–270–5

Entscheidung, welche Möglichkeit sinnvoll ist und wie die Umsetzung erfolgen soll, hängt von zahlreichen Faktoren ab. Somit muss immer eine einzelfallbezogene Vorgehensweise erarbeitet werden – möglicherweise mit der Erkenntnis, eine Sanierung zu unterlassen.

Sofern Regenwürmer etabliert oder gefördert werden können, ist eine starke synergetische Wechselwirkung zwischen Regenwurm- und Wurzelaktivität im (verdichteten) Boden innerhalb weniger Jahre wahrscheinlich. Von schadverdichteten Ackerböden ist eine Regeneration durch die Regenwurmaktivität innerhalb von ein bis zwei Jahren belegt (Capowiez et al. 2009), solange für Regenwürmer optimale Bedingungen vorherrschen.

Um die vielversprechende Möglichkeit der Regenwurmansiedlung erfolgreich durchzuführen, muss die zu etablierende Regenwurmart am Standort möglichst dauerhaft überlebensfähig sein. Dazu sind die Artunterschiede hinsichtlich Lebensformtyp und der Sensibilität auf Umweltfaktoren zu beachten, denn der Standort selbst darf keine lebensfeindlichen Bedingungen bieten. Die zu beachtenden Gegebenheiten sind nicht ohne Weiteres beeinflussbare Standortfaktoren (u. a. Witterung, Bodenart, Bodentyp) und die jeweilige Nutzung bzw. Bewirtschaftung (u. a. Parkplatznutzung, Laubentfernung, Baumscheibenbegrünung). Jeder limitierende Faktor (u. a. geringer oder hoher pH-Wert, geringes Nahrungsangebot, hohe Auftausalzgehalte), muss vor einer Regenwurmansiedlung erfolgreich behoben werden. Andernfalls ist eine dauerhafte Etablierung von Regenwürmern am Standort unmöglich.

Oftmals wird der pH-Wert als einer der Haupteinflussfaktoren auf die Verbreitung von Regenwürmern angesehen (Graefe & Beylich 2003). Viele Regenwurmarten bevorzugen Böden im schwach sauren bis neutralen Bereich und kommen auch auf sehr schwach alkalischen Böden vor (Dunger 2008). Ehrmann et al. (2002) stellten für Waldstandorte neben dem pH-Wert aber auch die Bodenart und die Bodenfeuchte als wichtige Einflussgrößen mit ihren Schwellenwerten heraus: Bei einer Bodenversauerung mit pH-Werten $< 3{,}8 \pm 0{,}3$ ($CaCl_2$) konnte der vollständige Ausfall von den Mineralboden bewohnenden Arten festgestellt werden. Lediglich wenige epigäische Arten überdauern eine derart hohe Bodenacidität. Außerdem stellten die Autoren bei wenig bindigen Böden (Tongehalt < 12 %) einen Ausfall der anecischen Arten und auf sehr sandigen Standorten (Tongehalte < 5 %) eine erheblich verringerte Anzahl endogäischer Arten fest. Letztlich wurden in einer großen Bandbreite von 2 bis 8 der Bodenkundlichen Feuchtestufen Regenwürmer dokumentiert (0 = trocken bis 10 = nass). An den trockensten Standorten wurden nur noch endogäische Regenwürmer festgestellt, wohingegen auf nassen Standorten anecische Regenwürmer fehlten.

Außerdem ist ein ausreichendes Nahrungsangebot für Regenwürmer überlebenswichtig. Hierbei spielt neben der Menge auch die Qualität der organischen Nahrung eine bedeutende Rolle, da nicht alle Regenwürmer die jeweilige Nahrung gleich gut nutzen (Ehrmann 1996). Allgemein wird Nahrung bei einem engen Kohlenstoff (C) zu Stickstoff (N) Verhältnis bevorzugt (Graff 1983). Eine Unterpflanzung mit ein- oder mehrjährigen Pflanzen mit engem C/N-Verhältnis dürfte die Nahrungssituation begünstigen. Ferner ist das dauerhafte Belassen der Laubstreu im Kronentraufbereich eine gute Möglichkeit zur Verbesserung der Nahrungssituation, wenngleich Regenwürmer nur Laub in unterschiedlichem Zersetzungsgrad annehmen und frisches Laub meiden (Curry & Schmidt 2007). Auch die Verwendung von organischem Mulch zur Bodenabdeckung kann positiv bewertet werden.

Darüber hinaus ist eine Belastung durch Auftausalze (Natriumchlorid) bei hohen Salzkonzentrationen direkt schädlich für Regenwürmer (Rahimi & Karimi 2016). Sofern Regenwürmer den Eintrag von Natriumchlorid am jeweiligen Standort ertragen, ist eine verringerte Kokonproduktion wahrscheinlich (Guzyte et al. 2011), durch die eine dauerhafte Etablierung eines stabilen Besatzes erheblich behindert wird. Am Baumstandort weist eine Bodenreaktion größer pH 8,3 oftmals auf einen negativen Einfluss von Auftausalz im Boden hin (Zuber 2013). Somit sollte der Einsatz von Auftausalzen im Kronentraufbereich unterbleiben.

Wollte man eine (Wieder-)Ansiedlung durchführen, sind drei Methoden bekannt. So können Regenwürmer auf der Bodenoberfläche in großer Anzahl ausgesetzt werden, damit sie sich anschließend eigenständig in den Boden eingraben. Das Eingraben kann durch vorgestochene Löcher beschleunigt werden (Judas et al.

1997). Diese Ausbringungsart sollte bestenfalls an Regentagen und mit Schutz vor Fressfeinden erfolgen.

Eine weitere Methode stellt das Einbringen von Boden aus Standorten mit hoher Besiedlungsdichte dar. So beschreibt Butt (2011) die Übertragung von Grassoden aus regenwurmreichen Grünlandstandorten. Die Ansiedlung endogäischer Regenwürmer ist damit vermutlich möglich. Die Übertragung von Boden ist wenig erfolgversprechend für die Ansiedlung tiefgrabender (anecischer) Regenwürmer, da diese sich in tiefere Bereiche ihres Gangsystems zurückziehen können und bei der Bodenentnahme nur unvollständig erfasst würden.

Außerdem steht die von Butt et al. (1995) in England entwickelte „Earthworm Inoculation Unit" zur Verfügung. Dabei werden Regenwürmer zunächst in Säcken mit Kultursubstrat vermehrt. Anschließend werden die mit Regenwürmern angereicherten Säcke, welche alle Regenwurm-Entwicklungsstufen enthalten, punktuell in den Boden eingegraben. Von diesen „Hotspots" aus soll eine Besiedlung erfolgen.

Welche der dargestellten Maßnahmen erfolgreich am urbanen Baumstandort realisiert werden kann, ist unbekannt. Untersuchungen beschränken sich oftmals auf landwirtschaftlich (Edwards & Lofty 1980; Stockdill 1982; Edwards & Bater 1992; Ligthart & Peek 1997; Forey 2018) und forstwirtschaftlich (Huhta 1979; Makeschin 1994; Beylich & Graefe 1996; Geißen et al. 1997; Judas et al. 1997) genutzte Standorte sowie auf Bergbaufolgelandschaften (Dunger 1969). Für Stadtbaumstandorte sind erste orientierende Untersuchungen aus England bekannt (Percival 2018) und in den Niederlanden erfolgt die Regenwurmausbringung zur Melioration urbaner Baumstandorte bereits seit mehreren Jahren (de Witt 2017). Aufgrund der geringen Datengrundlage können die Möglichkeiten und Grenzen einer Baumstandortsanierung durch Regenwürmer nur theoretisch bewertet werden.

An naturnahen Standorten ist mit einer größeren Wahrscheinlichkeit einer erfolgreichen Ansiedlung zu rechnen als bei anthropogen stark beeinflussten Standorten. So konnten Schulte et al. (1989) feststellen, dass städtische Aufschüttungsböden überwiegend eine geringere Regenwurmdichte (Abundanz) und Artenanzahl aufwiesen als weitgehend naturnahe Standorte. Für natürlich wirkende Böden (u. a. Braunerden, Parabraunerden) betrug die mittlere Abundanz etwa 300 Tiere/m². Gärtnerisch bearbeitete Böden (u. a. beetartige Baumscheiben) wiesen im Mittel etwa 80 Tiere/m² auf und für stark verdichtete Baumscheiben wurden etwa 25 Tiere/m² nachgewiesen. In Baumscheiben aus technischen Substraten (Blähton, Bims, Splitt) wurden keine Regenwürmer festgestellt.

Eine Verbesserung der Lebensbedingungen von Regenwürmern erscheint bei Standorten mit relativ geringem Regenwurmbesatz sinnvoll, denn die Tiere vor Ort haben sich bereits etabliert und benötigen „lediglich" bessere Rahmenbedingungen für das Bestandswachstum. Eine derartige Melioration dürfte auch das Einwandern von Regenwürmern aus naheliegenden Grünflächen fördern. Insbesondere bei isoliert liegenden Baumscheiben kann die Regenwurmausbringung die einzige Möglichkeit zur Etablierung eines Regenwurmbestandes sein. Derartige „Insellagen" sind somit besonders interessant für eine Regenwurmansiedlung im Wurzelraum von Bäumen.

6 Ausblick

Jeder Baumverantwortliche sollte seine Baumstandorte durch einfache Beobachtung anhand von Regenwurmspuren kennenlernen, denn das Vorhandensein von Regenwürmern zeigt oft eine gute Bodenqualität für Bäume an. Die aus der Ermittlung des Regenwurmbestands ableitbaren Folgerungen können grob in Stufen eingeteilt werden. So deutet das Fehlen von Regenwürmern auf ungünstige Bodeneigenschaften oder eine isolierte Lage hin. Kommen hingegen mehrere Arten sowie Lebensformtypen vor, weist dieses auf einen guten Zustand des Bodens für Bäume hin.

Zwischen diesen beiden Extremen befinden sich Baumstandorte mit auf den ersten Blick ungewöhnlich geringer Abundanz und/oder Artenanzahl. Hier sind oftmals Beeinträchtigungen des Bodens vorhanden, welche sich auf Regenwürmer und Bäume auswirken. Somit können über die Ermittlung des Regenwurmbestands indirekt manche bodenbürtigen Schadsymptome für Bäume eingegrenzt oder ausgeschlossen werden.

Jahrbuch der Baumpflege 2020, 24. Jg., S. 181–194, ISBN 978–3–87815–270–5

Letztlich besteht Forschungsbedarf zur Regenwurm-Baum-Interaktion im urbanen Umfeld, damit die Möglichkeiten und Grenzen zur Regenwurmansiedlung an urbanen Baumstandorten diskutiert werden können.

Literatur

Baatz, J.; Bauer, E. W.; Engelhardt, O.; Esders, S. N.; Gotthard, W.; Hampl, U.; Herzinger, H.; Kleesattel, W.; Lehr, H.; Piepenbrock, C.; Rodi, D.; Scharping, I.; Schmidt-Heinen, A.; Schwoebel, W.; Weber, U.; Werner, K.-H.; Wisniewski, H., 1996: Natur und Technik. Biologie 5/6. Hauptschule Baden-Württemberg, Cornelsen Verlag, Berlin, 240 S.

Beylich, A.; Graefe, U., 1996: Die Ansiedlung mineralbodenbewohnender Regenwürmer als ergänzende Maßnahme zur Regradation von Waldböden. Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft 81, 137–140.

Bieri, M.; Cuendet, G., 1989: Die Regenwürmer, eine wichtige Komponente von Ökosystemen. Schweizerische landwirtschaftliche Forschung 28(2), 81–96.

Blouin, M.; Hodson, M. E.; Delgado, E. A.; Baker, G.; Brussaard, L.; Butt, K. R.; Dai, J.; Dendooven, L.; Peres, G.; Tondoh, J. E.; Cluzeau, D.; Brun, J.-J., 2013: A review of earthworm impact on soil function and ecosystem services. European Journal of Soil Science, 64(2), 161–182.

Brown, G. G.; Feller, C.; Blanchart, E.; Deleporte, P.; Chernyanskii, S. S., 2003: With Darwin, earthworms turn intelligent and become human friends: The 7th international symposium on earthworm ecology. Cardiff Wales, 2002, Pedobiologia 47(5–6), 924–933.

Buch, W., 1986: Der Regenwurm im Garten. Eugen Ulmer, Stuttgart, 128 S.

Butt, K. R., 2011: The earthworm inoculation unit technique: development and use in soil improvement over two decades. In: Karaca, A. (Hrsg.): Biology of Earthworms. Springer, Heidelberg, 87–105.

Butt, K. R.; Frederickson, J.; Morris, R. M., 1995: An earthworm cultivation and soil inoculation technique for land restoration. Ecological Engineering 4(1), 1–9.

Capowiez, Y.; Cadoux, S.; Bouchand, P.; Roger-Estrade, J.; Richard, G.; Biozard, H., 2009: Experimental evidence for the role of earthworms in compacted soil regeneration based on field observation and results from a semi-field experiment. Soil Biology and Biochemistry 41, 711–717.

Christian, E.; Zicsi, A., 1999: Ein synoptischer Bestimmungsschlüssel der Regenwürmer Österreichs (Oligochaeta: Lumbricidae). Die Bodenkultur 50(2), 121–131.

Curry, J. P.; Schmidt, O., 2007: The feeding ecology of earthworms – A review. Pedobiologia 50(6), 463–477.

Darwin, C., 1882: Die Bildung der Ackererde durch die Thätigkeit der Würmer mit Beobachtung über deren Lebensweise. Aus dem Englischen übersetzt von J. Victor Carus. E. Schweizerbartsche Verlagshandlung (E. Koch), Stuttgart, 184 S.

de Witt, S., 2017: Eiken in Stadswandelpark nu in goede staat door gerichte acties. Boomzorg 2, 62–67.

Dunger, W., 2008: Tiere im Boden. Westarp Wissenschaften, Hohenwarsleben, 280 S.

Dunger, W., 1969: Fragen der natürlichen und experimentellen Besiedlung kulturfeindlicher Böden durch Lumbriciden. Pedobiologia 9, 146–151.

Edwards, C. A.; Bater, J. E., 1992: The use of earthworms in environmental management. Soil Biology and Biochemistry 24(12), 1.683–1.689.

Edwards, C. A.; Lofty, J. R., 1980: Effects of earthworm inoculation upon the root growth of direct drilled cereals. Journal of Applied Ecology 17(3), 533–543.

Ehrmann, O., 1996: Regenwürmer in einigen südwestdeutschen Agrarlandschaften: Vorkommen, Entwicklung bei Nutzungsänderungen und Auswirkungen auf das Bodengefüge. Hohenheimer Bodenkundliche Hefte 35, Stuttgart, 135 S.

Ehrmann, O.; Babel, U., 1991: Quantitative Regenwurmerfassung – ein Methodenvergleich. Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft 66(1), 475–478.

Ehrmann, O.; Brauckmann, H.-J.; Emmerling, C.; Fründ, H.-C., 2006: Erfassung und Bewertung von Regenwurmpopulationen – Vorschlag für ein mehrstufiges Bewertungsverfahren. In: Umweltbundesamt (Hrsg): Bodenbiologische Bewertung von Boden-Dauerbeobachtungsflächen (BDF) anhand von Lumbriciden. Workshop in Weimar, 30.11.–01.12.2006, 72–86.

Ehrmann, O.; Sommer, M.; Vollmer, T., 2002: Regenwürmer. In: Kandeler, E.; Kaupenjohann, M.; Stahr, K.; Streck, T. (Hrsg.): Böden als Lebensraum für Organismen – Regenwürmer, Gehäuseschnecken und Bodenmikroorganismen in Wäldern Baden-Württembergs. Hohenheimer Bodenkundliche Hefte 63, 13–52.

Forey, E.; Chauvat, M.; Coulibaly, S. F.; Langlois, E.; Barot, S.; Clause, J., 2018: Inoculation of an ecosystem engineer (Earthworm: Lumbricus terrestris) during experimental grassland restoration: Consequences for above and belowground soil compartments. Applied Soil Ecology 125, 148–155.

Fründ, H.-C., 2010: Regenwürmer – die natürliche Bodenbearbeitung. Heimische Arten, Lebensweise und Maßnahmen zur Förderung. Landwirtschaft ohne Pflug 11(12), 30–34.

Fründ, H.-C.; Jordan, B., 2004: Eignung verschiedener Senfzubereitungen als Alternative zu Formalin für die Austreibung von Regenwürmern. Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft 103, 25–26.

Füller, H., 1954: Die Regenwürmer. A. Ziemsen Verlag, Wittenberg, 56 S.

Geißen, V.; Brenner, A.; Schöning, A.; Brümmer, G. W., 1997: Auswirkungen von Kalkungs-, Düngungs- und faunistischen Wiederbesiedelungsmaßnahmen auf die Lumbricidenfauna von Waldböden. Verhandlungen der Gesellschaft für Ökologie 27, 419–426.

Graefe, U.; Beylich A., 2003: Critical values of soil acidification for annelid species and the decomposer community. Newsletter on Enchytraeidae 8, 51–55.

Graff, O., 1979: Die Regenwurmfrage im 18. und 19. Jahrhundert und die Bedeutung Victor Hensens. Zeitschrift für Agrargeschichte und Agrarsoziologie 27(2), 232–243.

Graff, O., 1983: Unsere Regenwürmer. Lexikon für Freunde der Bodenbiologie. Verlag M. & H. Schaper, Hannover, 112 S.

Guzyte, G.; Sujetoviene, G.; Zaltauskaite, J., 2011: Effects of Salination on earthworm (*Eisenia fetida*). Environmental Engineering 8, 111–114.

Hansche, K., 1988: Der Regenwurm: Bedeutung – Vermehrung – Einsatzmöglichkeiten. Leopold Stocker Verlag, Graz, 64 S.

Huhta, V., 1979: Effects of liming and deciduous litter on earthworm (Lumbricidae) populations of a spruce forest, with an inoculation experiment on Allolobophora caliginosa. Pedobiologia 19(5), 340–345.

Jiménez, J. J.; Decaëns, T.; Thomas, R. J.; Lavelle, P., 2001: Soil macrofauna: an available but little known natural resource. In: Jiménez, J. J.; Thomas, R. J. (Hrsg.): Nature's Plow: Soil Macroinvertebrate Communities in the Neotropical Savannas of Colombia. Centro Internacional de Agricultura Tropical, 1–16.

Joschko, M.; Diestel, H.; Larink, O., 1989: Assessment of earthworm burrowing efficiency in compacted soil with a combination of morphological and soil physical measurements. Biology and Fertility of Soils 8(3), 191–196.

Judas, M.; Schauermann, J.; Meiwes, K.-J., 1997: The inoculation of *Lumbricus terrestris* L. in an acidic spruce forest after liming and its influence on soil properties. Soil Biology and Biochemistry 29(3–4), 677–679.

Kavdir, Y.; İlay, R., 2011: Earthworms and soil structure. In: Karaca, A. (Hrsg.): Biology of Earthworms. Springer, Heidelberg, 39–50.

Keudel, M.; Schrader, S., 1999: Axial and radial pressure exerted by earthworms of different ecological groups. Biology and Fertility of Soils 29(3), 262–269.

Kobel-Lamparski, A.; Lamparski F., 2004: *Lumbricus badensis* – ein Franzose, der in Baden groß wurde. Mitteilungen des badischen Landesvereins für Naturkunde und Naturschutz 18(3), 91–109.

Krück, S., 2018: Bildatlas zur Regenwurmbestimmung mit einem Kompendium der Regenwurmfauna des Nordostdeutschen Tieflandes. Natur+Text, Rangsdorf, 196 S.

Larink, O.; Schrader, S., 2000: Rehabilitation of degraded compacted soil by earthworms. In: Horn, R.; van den Akker, J. J. H.; Arvidson, J. (Hrsg): Subsoil Compaction – Distribution, Processes and Consequences. Advances in GeoEcology 32, Catena Verlag, Reiskirchen, 284–294.

Lehmitz, R.; Römbke, J.; Graefe, U.; Beylich, A.; Krück, S., 2016: Rote Liste und Gesamtartenliste der Regenwürmer (Lumbricidae et Criodrilidae) Deutschlands. In: Bundesamt für Naturschutz (Hrsg.): Rote Liste gefährdeter Tiere, Pflanzen und Pilze Deutschlands. Band 4: Wirbellose Tiere (Teil 2). Naturschutz und Biologische Vielfalt 70 (4), Westermann Druck, Zwickau, 565–590.

Ligthart, T. N.; Peek, G. J. C. W., 1997: Evolution of earthworm burrow systems after inoculation of lumbricid earthworms in a pasture in the Netherlands. Soil Biology and Biochemistry 29(3–4), 453–462.

Makeschin, F., 1994: Experimentelle Untersuchungen zur Besiedelung anthropogen devastierter, saurer Waldböden mit leistungsfähigen Lumbriciden. Habilitationsschrift, Akademischer Verlag, München, 197 S.

Meinhardt, U., 1986: Alles über Regenwürmer. Kosmos, Stuttgart, 70 S.

Minnich, J., 1977: The earthworm book. How to raise and use earthworms for your farm and garden. Rodale Press, Emmaus, 372 S.

Müller-Inkmann, M.; Fründ, H.-C.; Hemker, O., 2013: An experimental setup to assess earthworm behaviour in compacted soil. Biology and Fertility of Soils 49(3), 363–366.

Percival, G., 2018: The Use of Vertical Mulching and Worm Technology for Long Term Soil De-Compaction. Abgerufen am 02.01.2020 unter: www.trees.org.uk/Trees.org.uk/media/Trees-org.uk/Documents/Conference18/WedAM-GlynnPercival-lr.pdf

Peters, W.; Walldorf, V., 1986: Der Regenwurm – *Lumbricus terrestris* L. Eine Praktikumsanleitung. Quelle & Meyer Verlag, Heidelberg, 174 S.

Rahimi, G.; Karimi, F., 2016: The prolonged effect of salinity on growth and/or survival of earthworm *Eisenia fetida*. International Journal of Environmental and Waste Management 18(1), 58–67.

Römbke, J.; Blick, T.; Dorow, W. H. O., 2012: Die Regenwürmer (Lumbricidae) des Naturwaldreservats Kinzigaue (Hessen). Untersuchungszeitraum 1999–2001. In: Blick, T.; Dorow, W. H. O.; Kopelke, J.-P.: Kinzigaue. Zoologische Untersuchungen 1999–2001, Teil 1. Naturwaldreservate in Hessen 12, 23–51.

Römbke, J.; Blick, T.; Dorow, W. H. O., 2017: *Allolobophoridella eiseni* (Lumbricidae), a truly arboreal earthworm in the temperate region of Central Europe. Soil Organisms 89(2),75–84.

RUBZ (Regionales Umweltbildungszentrum Lernstandort Noller Schlucht) 2000: Werkbuch Regenwurm für Kindergarten und Grundschule. Edition Liberación, Georgsmarienhütte, 139 S.

Schulte, W.; Fründ, H.-C.; Söntgen, M.; Graefe, U.; Ruszkowski, B.; Voggenreiter, V.; Weritz, N., 1989: Zur Biologie städtischer Böden. Beispielraum: Bonn – Bad Godesberg. Kilda-Verlag, Greven, 192 S.

Stockdill, S. M. J., 1982: Effects of introduced earthworms on the productivity of New Zealand pastures. Pedobiologia, 24(1), 29–35.

Tajbakhsh, J.; Goltapeh, E. M.; Varma, A., 2011: Vermicompost as a biological soil amendment. In: Karaca, A. (Hrsg.): Biology of Earthworms. 215–228.

Topp, W., 1981: Biologie der Bodenorganismen. Quelle & Meyer, Heidelberg, 224 S.

Weltecke, K.; Gaertig, T., 2012: Influence of soil aeration on rooting and growth of the Beuys-trees in Kassel, Germany. Urban Forestry & Urban Greening 11(3), 329–338.

Zaborski, E. R., 2003: Allyl isothiocyanate: an alternative chemical expellant for sampling earthworms. Applied Soil Ecology 22(1), 87–95.

Zuber, R., 2013: Streusalz: Auswirkungen auf die Straßenbäume und Gegenmassnahmen. Literaturstudie im Auftrag der Vereinigung Schweizerischer Stadtgärtnereien und Gartenbauämter. Abgerufen am 10.01.2020 unter: www.vssg.ch/documents/130000_Streusalz-Literaturreche-2013DEF.pdf.

Autor

Michael Müller-Inkmann unterrichtet an der DEULA Westfalen-Lippe GmbH im Fachbereich GaLaBau und ist Inhaber des Sachverständigenbüros Baum und Boden sowie Gründungsmitglied im Arbeitskreis Baum im Boden.

Michael Müller-Inkmann, M.Eng.
DEULA Westfalen-Lippe GmbH
Dr.-Rau-Allee 71
48231 Warendorf
Tel. (02581) 635851
m.mueller-inkmann@deula-waf.de