



LfL

Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft

Auswirkungen von Überflutungen landwirtschaftlicher Nutzflächen auf Regenwürmer im Boden



Schriftenreihe

10
2016
ISSN 1611-4159

Impressum

Herausgeber: Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL)
Vöttinger Straße 38, 85354 Freising-Weihenstephan
Internet: www.LfL.bayern.de

Redaktion: Institut für Ökologischen Landbau, Bodenkultur und Ressourcenschutz
Lange Point 12, 85354 Freising-Weihenstephan
E-Mail: Agrarökologie@LfL.bayern.de
Telefon: 08161 71-3640

1. Auflage: November 2016

Druck: ES-Druck, 85356 Freising-Tüntenhausen

Schutzgebühr: 5,00 Euro

© LfL



Auswirkungen von Überflutungen landwirtschaftlicher Nutzflächen auf Regenwürmer im Boden

Roswitha Walter, Robert Brandhuber, Johannes Burmeister,
Christa Müller

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1	Zusammenfassung.....9
2	Abstract.....11
3	Einführung in die Problematik.....13
4	Heizölverunreinigung von landwirtschaftlichen Nutzflächen.....16
4.1	Messungen der Mineralölkohlenwasserstoffe (MKW).....16
4.2	MKW-Gehalte 6 Wochen und 5 Monate nach der Verunreinigung17
5	Junihochwasser 2013 – Auswirkungen auf Regenwürmer im Acker?.....19
5.1	Untersuchungsflächen im Überflutungsgebiet Donauaue.....19
5.2	Methode der Regenwurmerfassung.....21
5.3	Regenwurmbestand vier Monate nach dem Junihochwasser 2013.....22
5.4	Regenwurmbestand sechzehn Monate nach dem Junihochwasser 2013.....26
6	Regelmäßige Überflutungen von Grünland in der Flutmulde Landshut – Auswirkungen auf Regenwürmer?29
6.1	Untersuchungsflächen29
6.2	Methode der Regenwurmerfassung.....31
6.3	Regenwurmbestand in der Flutmulde Landshut.....31
7	Anpassungsstrategien von Regenwürmern Überschwemmungen zu überdauern und ihre Grenzen33
7.1	Anpassungsstrategien der Regenwürmer33
7.2	Gefahren von Überflutungen für Bodentiere34
8	Dezentraler Hochwasserschutz und Förderung von Regenwürmern37
8.1	Förderung des Wasserrückhalts in landwirtschaftlich genutzten Flächen – Bedeutung der Regenwürmer.....37
8.2	Empfehlungen zur Förderung von Regenwürmern.....41
9	Fazit43
	Literaturverzeichnis.....45
	Dank

Abbildungsverzeichnis

	Seite
Abb. 1: Überflutung in Niederalteich (Raum Deggendorf) am 5. Juni 2013, 1 bis 2 Tage nach dem Hochwasserscheitel (Foto: W. Bauer, Agroluftbild)	13
Abb. 2: Tote Regenwürmer nach Überflutung in einem Zuckerrübenfeld im Raum Augsburg (Foto: A. Högenauer, 10. Juni 2013).....	14
Abb. 3: Siedlungsnaher, mit Heizöl verunreinigter Bereich eines Klee grasackers (F-1, zur Lage siehe auch Abb. 5, Abb. 6) bei Niederalteich mit deutlich erkennbaren Vegetationsschäden im Juli 2013 (Foto: C. Müller).	16
Abb. 4: Hochwasser 1999: Rückgang der MKW-Belastung in Südbayern (Suttner et al., 2002).....	18
Abb. 5: Lage ausgewählter Untersuchungsstellen für Regenwürmer bei Niederalteich kurz nach dem Hochwasserscheitel am 5. Juni 2013 (Luftbild: Agroluftbild, W. Bauer), Erläuterungen zu den Untersuchungsflächen siehe Tab. 3 und Abb. 6.....	19
Abb. 6: Lage der Untersuchungsflächen bei Niederalteich zur Erfassung des Regenwurm bestandes.....	20
Abb. 7: Regenwurmprobenahme vier Monate nach der Überflutung im Oktober 2013 bei Niederalteich in der Zwischenfrucht (links) und im Klee gras (Mitte) sowie im Oktober 2014 im abgeernteten Körnerma isfeld (rechts) (Fotos: R. Walter).....	22
Abb. 8: Durchschnittliche Individuendichte und Biomasse der Regenwürmer von überfluteten Äckern (blau) und einer zusätzlich mit Heizöl verunreinigten Ackerfläche (orange) im Vergleich zu nicht überfluteten Äckern (grün) bei Niederalteich im Oktober 2013 vier Monate nach dem Junihochwasser (Mittelwerte mit Standardabweichung, jeweils n=6 Stichproben, konv. Nutzung: konventionelle Bewirtschaftung, öko. Nutzung: ökologische Bewirtschaftung)	23
Abb. 9: Flutmulde Landshut und Lage der beiden auf den Regenwurm bestand im Oktober 2014 untersuchten Grünlandflächen (Kartengrundlage: Bayerische Vermessungsverwaltung 2015)	29
Abb. 10: Pegelstände der Pfettrach in der Flutmulde Landshut, Flutungen der Flutmulde fanden im Juni 1979, im Mai 1999, im August 2005 und im Juni 2013 statt. (Quelle: http://www.hnd.bayern.de/pegel/wasserstand/).....	30
Abb. 11: Blick in die geflutete Flutmulde Landshut beim Hochwasser 2013 (Foto: R. Brandhuber, 4.6.2013)	30
Abb. 12: Flutmulde Landshut ohne Überflutung (Foto: R. Brandhuber 14.11.2015).....	30
Abb. 13: Regenwurmprobenahme in der Flutmulde Landshut im Oktober 2014 (Foto: R. Walter)	31
Abb. 14: Aus einem Kokon schlüpfender Regenwurm - ein Regenwurmkokon gilt als das widerstandsfähigste Stadium zur Überdauerung von unwirtlichen Phasen (Foto: R. Walter).....	33
Abb. 15: Eingekringelter Regenwurm in Diapause - endogäische Arten überdauern häufig in dieser Ruhephase ungünstige Lebensbedingungen (Foto: R. Walter).....	33
Abb. 16: Senken und Mulden, in denen das Wasser länger steht und sich erwärmt, bieten für Regenwürmer und viele andere Bodenorganismen ungünstige Lebensbedingungen (Foto: Isaraue bei Landshut, Juni 2013, H. Heuwinkel)	34

Abb. 17: Fahrspuren nach zu frühzeitigem Befahren von noch nicht ausreichend abgetrockneten Böden (Fotos: R. Walter).....	35
Abb. 18: Mulchsaatverfahren zu Reihenkulturen (links: abgefrorene Zwischenfrucht Ende März 2015 vor einer Zuckerrüben-Mulchsaat, rechts: Streifenbodenbearbeitung, Strip-Till-Verfahren bei Zuckerrübe Mitte Mai 2013, Fotos: R. Walter).....	38
Abb. 19: Von Lumbricus terrestris an der Bodenoberfläche zusammengezogene Strohhäufchen auf einem seit 20 Jahren pfluglos bearbeiteten Acker mit Winterroggen im Nov. 2014. Das Stroh der Vorfrucht Winterweizen wird von der Art nach und nach in seine vertikalen Röhren in den Boden eingebracht. (Foto: R. Walter).....	39
Abb. 20: Leistungen der Regenwürmer am Beispiel zweier gleichermaßen mit Boden, Gülle und Stroh befüllter Terrarien, links mit und rechts ohne eingesetzte Regenwürmer jeweils 5 Monate danach. Durch die Aktivität von 10 Regenwürmern (anezische und endogäische Arten) wurde das an der Oberfläche ausgebrachte Stroh sowie die Rindergülle weitgehend in den Boden eingezogen und zahlreiche luft- und dränfähige Regenwurmröhren geschaffen. (Foto: R. Walter).....	39
Abb. 21: Anteil ungepflügter Ackerflächen für die Regierungsbezirke in Bayern (M. Treisch).....	40

Tabellenverzeichnis

	Seite
Tab. 1: Ökologische Gruppen der Regenwürmer (verändert nach DUNGER 2008, Fotos: R. Walter).....	15
Tab. 2: Mineralölkohlenwasserstoffgehalte (MKW) 6 Wochen und 5 Monate nach der Verunreinigung mit Heizöl beim Juni-Hochwasser 2013 (BG: Bestimmungsgrenze, Messungen durchgeführt von Dr. Eiberweiser GeoConsult GmbH).....	17
Tab. 3: Charakterisierung der Untersuchungsflächen in Niederalteich, Anzahl überfluteter Tage und angebaute Kulturen während der Überflutung (ÜF) im Juni 2013 und zum Zeitpunkt der Regenwurmprobenahme im Oktober 2013 (konv.: konventionelle Bewirtschaftung, öko: ökologische Bewirtschaftung, + Öl: mit Heizöl verunreinigt)	21
Tab. 4: Individuendichte (Individuen/m ²) der Regenwurmartens im Oktober 2013 vier Monate nach der Überflutung im Vergleich zu nicht überfluteten Kontrollflächen (A _{konv} , D _{öko}) in Niederalteich (Mittelwerte, n=6).....	24
Tab. 5: Biomasse (g/m ²) der Regenwurmartens im Oktober 2013 vier Monate nach der Überflutung im Vergleich zu nicht überfluteten Kontrollflächen (A _{konv} , D _{öko}) in Niederalteich (Mittelwerte, n=6)	25
Tab. 6: Individuendichte (Individuen/m ²) der Regenwurmartens vier (Okt. 2013) und sechzehn (Okt. 2014) Monate nach der Überflutung im Vergleich zu einer nicht überfluteten Kontrollfläche (D _{öko}) in Niederalteich (Mittelwerte, n=6)	26
Tab. 7: Biomasse (g/m ²) der Regenwurmartens vier (Okt. 2013) und sechzehn (Okt. 2014) Monate nach der Überflutung im Vergleich zu einer nicht überfluteten Kontrollfläche (D _{öko}) in Niederalteich (Mittelwerte, n=6)	27
Tab. 8: Individuendichte und Biomasse der Regenwürmer von zwei Grünlandflächen der Flutmulde in Landshut im Oktober 2014, sechzehn Monate nach der letzten Flutung (Mittelwerte, n=5)	32
Tab. 9: Maßnahmen zur Förderung des Regenwurmbestandes auf landwirtschaftlichen Nutzflächen.....	42

1 Zusammenfassung

Das Hochwasser Anfang Juni 2013 führte in Bayern vor allem entlang der Donau, Isar und im Einzugsbereich des Inns zu Überflutungen von landwirtschaftlich genutzten Flächen. Danach berichteten einige Landwirte von toten Regenwürmern auf der Bodenoberfläche von Äckern. Ziel der Untersuchungen war es, die Auswirkungen der Überflutung auf die Individuendichte, Biomasse und Artenvielfalt der Regenwürmer im Vergleich zu nicht überfluteten landwirtschaftlichen Nutzflächen zu erfassen und dabei auch mögliche Effekte einer Verunreinigung durch Heizöl aufzuzeigen.

Für die Regenwurmuntersuchung dienten sowohl mehrere konventionell als auch ökologisch bewirtschaftete Ackerflächen in der Donauaue bei Niederalteich, im Landkreis Deggendorf, als auch zwei geflutete Grünlandflächen der Flutmulde Landshut. Vier bis acht Tage lang und bis zu einer Höhe von ca. 2,5 m betrug die Überstauung der beprobten Flächen beim Junihochwasser 2013. Die Probenahmen der Regenwürmer fanden in Niederalteich vier Monate nach dem Hochwasserereignis im Oktober 2013 statt. Ein Teil der Flächen wurde im Oktober 2014 erneut beprobt. Im Oktober 2014 erfolgten auch die Untersuchungen in der Flutmulde Landshut. Zur Erfassung der Regenwürmer kam eine Methodenkombination bestehend aus einer Austreibung und einer anschließenden Handauslese zum Einsatz mit jeweils fünf bis sechs Stichproben je Untersuchungsfläche.

Auf einem überfluteten Kleegrasacker in Niederalteich war zudem ein kleiner siedlungsnaher Bereich von wenigen hundert Quadratmetern mit Heizöl verunreinigt. Dort erfolgten ergänzend zur Regenwurmerfassung auch Messungen zu den Mineralölkohlenwasserstoffen (MKW) Gehalten am 18. Juli 2013 und am 5. November 2013 von Dr. Eiberweiser GeoConsult GmbH durch eine Rasterbeprobung mit Stechzylindern in einer Bodentiefe von 0-2 cm und 2-5 cm. Siedlungsfernere Ackerbereiche desselben Feldstücks ohne ersichtliche Vegetationsschäden wurden als Vergleichsflächen im Oktober 2013 und 2014 auf den Regenwurmbestand und Anfang November 2013 auf MKW-Gehalte untersucht.

Die meisten der überfluteten Ackerflächen bei Niederalteich wiesen bereits vier Monate nach der bis zu einer Woche dauernden Überflutung keine geringere Individuendichte, Biomasse und keine geringere Artenvielfalt der Regenwürmer im Vergleich zu nicht überfluteten Kontrolläckern mit ähnlicher Bewirtschaftung auf. Mögliche Auswirkungen der Überflutung im Juni 2013 auf Regenwürmer betrafen wahrscheinlich nur einen kleinen Teil ihrer Populationen. Sie waren im Oktober 2013 nicht mehr quantifizierbar, vermutlich aufgrund der nach dem Juni-Hochwasser 2013 auftretenden langanhaltenden Sommertrockenheit, die sich ebenfalls ungünstig auf Regenwürmer auswirken konnte. So wird auch die lediglich auf einem Feldstück im Oktober 2013 festgestellte geringe Regenwurmdichte auf eine stärkere Austrocknung z.B. durch andere Standortbedingungen zurückgeführt, so dass dort ein Teil der Tiere sich noch im methodisch nicht erfassbaren Kokonstadium oder in Diapause befand. Daraufhin deutet die dort festgestellte starke Erhöhung der Regenwurmbestandszahlen innerhalb nur eines Jahres sowie der Nachweis weiterer Arten im Jahr 2014. Insgesamt bestätigen die Untersuchungen in Niederalteich, dass Regenwürmer Überflutungen von Ackerflächen im Sommer zumindest bis zu einer Woche überstehen können und hierfür gute Anpassungsstrategien (z.B. Diapause, Kokonstadium) haben.

In beiden Grünlandflächen der Flutmulde in Landshut wurde im Oktober 2014, sechzehn Monate nach der Flutung im Juni 2013 mit über 400 Individuen/m² ein überdurchschnittlicher Regenwurmbestand ermittelt, so dass auch längerfristig keine negativen Auswirkungen feststellbar waren. Mit *Aporrectodea georgii*, *Proctodrilus tuberculatus* und *Fitzingeria*

ria platyura traten dort drei seltenere Regenwurmarten auf. Von der am empfindlichsten auf eine Überflutung reagierenden tiefgrabenden Lebensform wurden in der Flutmulde sogar zwei Arten nachgewiesen. Die Regenwürmer profitieren wahrscheinlich davon, dass das Wasser die Flutmulde durchfließt und sich dies günstig auf den Sauerstoffgehalt im Wasser auswirkt.

Auf der mit Heizöl verunreinigten Fläche bei Niederalteich wurde Mitte Juli 2013 ein stark erhöhter MKW-Gehalt von 5800 mg/kg Boden in einer Bodentiefe von 0-2 cm festgestellt, der Anfang November 2013 bereits auf 83 mg/kg abgesunken war. In der Tiefe von 2 bis 5 cm lag der MKW-Gehalt stets unter der Bestimmungsgrenze von 50 mg/kg Boden genauso in den siedlungsferneren Vergleichsflächen desselben Feldstücks. Die MKW-Verunreinigung durch Heizöl verblieb somit in der obersten Bodenzone und es hat keine Verlagerung in tiefere Schichten stattgefunden. Zudem bestätigen die Ergebnisse die schnelle Abbaubarkeit von Mineralölkohlenwasserstoffen in Böden unter atmosphärischen Bedingungen nach einer intensiven Belüftung durch eine oberflächennahe, die mikrobiologische Aktivität anregenden Vertikutierung. Aus diesen Gründen waren wahrscheinlich auch keine ungünstigen Auswirkungen der Heizölverunreinigung auf die Siedlungsdichte, Biomasse und Artenvielfalt der Regenwürmer nachweisbar. Günstig für die Regenwürmer war wahrscheinlich zudem, dass die MKW-Belastung im Sommer während ihrer Ruhephase auftrat, wenn sich diese in tiefere Bodenschichten zurückziehen. Dennoch gilt es zu berücksichtigen, dass bereits bei geringeren MKW-Werten toxische Effekte auf Regenwürmer in anderen Untersuchungen (Labor) festgestellt wurden.

Generell werden nach Überflutungen in der Literatur sowohl positive, wie z.B. eine Zunahme der Individuendichte und Vielfalt der Regenwürmer, als auch negative Effekte wie ein Zusammenbruch von Populationen beschrieben. Der Grad möglicher Auswirkungen einer Überflutung auf den Regenwurmbestand wird im Wesentlichen von der Dauer und Häufigkeit der Überflutung sowie von der Wassertemperatur und dem Sauerstoffgehalt bestimmt. Falls Bestandsverluste der Regenwürmer nach einem Hochwasserereignis im Boden landwirtschaftlicher Nutzflächen auftreten, gibt es zahlreiche Möglichkeiten zu ihrer gezielten Förderung. Empfohlen werden z.B. eine ausreichende Zufuhr von organischem Material und der Anbau von Zwischenfrüchten und Leguminosengemenge. Um Bodenstrukturschäden zu vermeiden und zur Erhaltung eines vielfältigen, funktionalen Bodenlebens ist es wichtig, nach einer Überflutung auf eine bodenschonende Bewirtschaftung zu achten (z.B. kein Befahren von feuchten Böden).

Für den dezentralen Hochwasserschutz werden auf Ackerflächen mulchende Bodenbearbeitungs- und Bestellverfahren empfohlen. Diese wirken sich auch günstig auf Regenwürmer aus, vor allem auf tiefgrabende Arten, die durch ihre vertikalen Röhren positiv die Wasserversickerung fördern. So kann insbesondere in ackerdominierten Agrarlandschaften das Wasserrückhaltepotential bei konvektiven Starkniederschlagsereignissen weiter ausgeschöpft und zur Minderung von Erosion und von kleineren Hochwasserereignissen beigetragen werden.

2 Abstract

The flood of early June 2013 led to an inundation of agricultural land in Bavaria along the rivers Danube, Isar and in the drainage area of the Inn. Afterwards farmers recounted of death earthworms on the surface of their fields. The aim of this study was to analyze the effects of the flooding on the abundance, biomass and diversity of earthworms as compared to non-flooded agricultural areas and in addition also to investigate the impact of soil pollution by heating oil on earthworms.

For the earthworm sampling several conventionally as well as ecologically managed agricultural fields near Niederalteich (county Deggendorf) were selected and also two inundated grasslands in the floodplain Landshut. The investigated sites, located in South Germany (Bavaria), were flooded for four to eight days and with a water level of up to 2.5 m during the flood of June 2013. Samples of earthworms were taken in Niederalteich four months after the flooding in October 2013. Parts of the sites were investigated again in October 2014. Also in October 2014 sampling was undertaken in the floodplain of Landshut. To collect the earthworms a combination of two methods was carried out, an expelling followed by a hand-sorting with five to six samples per experimental site.

On a flooded clover field in Niederalteich, a small area near the settlement of only a few 100 m² was polluted with heating oil. Here in addition to the earthworm assessment the petroleum-derived hydrocarbons content was measured on July 18th 2013 and November 13th 2013 by Dr. Eiberweiser GeoConsult GmbH through a grid sampling with sample rings at a soil depth of 0-2 cm and 2-5 cm. Areas further away from the settlement of the same field without recognizable vegetation damage were assessed as a comparison regarding the abundance of earthworms in October 2013 and 2014 and in early November 2013 regarding the petroleum-derived hydrocarbons content.

Already four months after the flooding which lasted up to a week, most of the inundated fields near Niederalteich did not show a lower abundance, biomass or diversity compared to non-flooded fields with a similar agricultural cultivation. Possible adverse effects of the flooding in June 2013 probably just affected a small fraction of the earthworm population. In October 2013 these effects could no longer be quantified, most likely also because of the pronounced summer draught occurring after the June 2013 flood, which also had an adverse effect on the earthworms. Therefore, the lower earthworm abundance on only one plot in October 2013 can be ascribed to a stronger drying out due to e.g. different site conditions, where parts of the earthworm community were still in an undetectable cocoon or diapause stadium. This is affirmed by the strong increase of the number of earthworm species registered at the site within only one year as well as by the recording of other species in 2014. Overall, the results in Niederalteich confirm that earthworms can survive summer flooding of agricultural land for at least up to a week and that they have good adaptation strategies (e.g. diapause, cocoon stadium) for inundation.

On both pastures of the floodplain Landshut an earthworm abundance above average with more than 400 individuals per m² were detected 16 months after the inundation in June 2013, indicating that also in the long term no negative effects could be noted.

With *Aporrectodea georgii*, *Proctodrilus tuberculatus* and *Fitzingeria platyura* three rare earthworm species appeared on this site. Even two species of the anecic earthworm, which are most sensitive to flooding, were registered in the floodplain of Landshut. The fact that the water flows through the floodplain instead of stagnating has a positive influence on the

oxygen content of the water. Earthworms profit from this as their cutaneous respiration allows them to absorb oxygen from the water as well.

On the area near Niederalteich contaminated by the heating oil a strongly increased petroleum-derived hydrocarbons content of 5800 mg/kg soil in a soil depth of 0-2 cm was noted in mid-July 2013 but which had already decreased to 83 mg/kg soil by early November 2013. In the depth of 2-5 cm petroleum-derived hydrocarbons content was always below the detectable level of 50 mg/kg soil as it was the case for the comparable experimental plots of the same field further away from the settlement. The contamination by the heating oil was thus limited to upper soil layers and no shift to lower soil areas took place. Moreover, the results confirm the rapid degradability of petroleum-derived hydrocarbons in soils under atmospheric conditions after intensive ventilation through a dethatching near the surface stimulating microbiological activity. Probably for this reason no unfavorable effects of the heating oil pollution on the abundance, biomass and diversity of the earthworms could be detected. Additionally, it was probably favorable for the earthworms that the petroleum-derived hydrocarbons contamination occurred in summer during the diapause of the earthworms when they retreat to lower soil levels. Yet it has to be considered that already at low petroleum-derived hydrocarbons levels toxic effects were noted in other studies (laboratory).

Generally studies describe positive effects such as an increase of abundance and diversity of earthworms as well as negative effects like the breakdown of populations after an inundation. The appearance of favorable or adverse effects after an inundation on an earthworm community is determined mainly by the duration and frequency of the flooding as well as the water temperature and the oxygen content. If a loss in earthworm population occurs after a flooding event on areas of agricultural land use there is a wide range of agricultural measures to enhance the earthworm abundance. For example organic fertilizing and the cultivation of intercrops and legume mixtures are recommended. To avoid damage in the soil structure and to maintain a diverse and functional soil fauna it is vital to adhere to a protective soil cultivation (e.g. not driving on wet soil) after an inundation.

Mulching soil cultivation methods are recommended for a decentralized flood protection on agricultural fields. These measures have a positive influence on earthworms especially on anecic species which improve the infiltration degree with their vertical burrows. The potential for water retention during convective heavy rainfall events especially in agricultural landscapes dominated by fields can thus be further enhanced and contribute to decreasing the impact of erosion and minor flooding events.

3 Einführung in die Problematik

Innerhalb von nur 15 Jahren wurde Bayern viermal von „Jahrhunderthochwasser“ heimgesucht, dem Pfingsthochwasser 1999, die Augusthochwasser in den Jahren 2002 und 2005 und zuletzt dem Junihochwasser 2013. Vor allem entlang der Donau, der Isar und im Einzugsbereich des Inns führte das Hochwasser Anfang Juni 2013 zu Überflutungen von landwirtschaftlich genutzten Flächen über mehrere Tage (Abb. 1).



Abb. 1: Überflutung in Niederaltach (Raum Deggendorf) am 5. Juni 2013, 1 bis 2 Tage nach dem Hochwasserscheitel (Foto: W. Bauer, Agroluftbild)

Nach der Überflutung berichteten einige Landwirte von toten Regenwürmern auf der Bodenoberfläche von Äckern, v.a. entlang von Fahrspuren und Abflussrinnen (Abb. 2). Die Landwirte waren besorgt, da Regenwürmer durch ihre vielseitigen Leistungen die Bodenfruchtbarkeit verbessern (BIERI & CUENDET 1989, BLOUIN et al. 2013, DUNGER 2008, EHRMANN 2012a, GRAFF 1983). Ihre Grabtätigkeit fördert die Durchmischung von toter organischer Substanz mit dem Mineralboden, den Aufbau eines stabilen Bodengefüges und leistet einen wichtigen Beitrag zum luft- und wasserführenden Porensystem. Durch die Zerkleinerung und Einmischung von organischer Substanz in den Boden wirken sie auch positiv auf die Nährstoffnachlieferung ein. In Deutschland sind 47 verschiedene Regenwurmarten bekannt (LEHMITZ et al. 2016). Die meisten nutzen den Boden als Lebensraum und werden in streubewohnende, flachgrabende Mineralschichtbewohner und tiefgrabende Arten eingeteilt (Tab. 1). Ein guter Regenwurmbestand weist auf einen funktionsfähigen, biologisch aktiven Boden hin. Regenwürmer gelten deshalb als Indikatoren für den Zustand des Ökosystems Boden. Nicht zu vernachlässigen ist zudem der positive

Einfluss eines guten Regenwurmbestandes auf die Biodiversität, da für zahlreiche Tiere in der Agrarlandschaft Regenwürmer eine wichtige Nahrungsgrundlage darstellen. Beispielsweise Laufkäfern (v.a. *Carabus* Arten), Säugetieren (Spitzmäuse, Igel etc.), Vögeln (Drosseln, Krähen, Kiebitze, Weißstörche etc.) und Amphibien dienen Regenwürmer als Beute (LUKASIEWICZ, 1996, BAUER et al. 2005, DUNGER 2008, GRAFF 1983). Die Artenzusammensetzung und die Anzahl der im Boden lebenden Regenwürmer können somit einen günstigen Effekt auf trophisch nachgelagerte Lebensgemeinschaften und die Artenvielfalt einer Agrarlandschaft haben.



Abb. 2: Tote Regenwürmer nach Überflutung in einem Zuckerrübenfeld im Raum Augsburg (Foto: A. Högenauer, 10. Juni 2013).

Die Auswirkungen von Überflutungen auf Regenwürmer werden vor allem durch Dauer, Häufigkeit und räumliche Ausdehnung des Hochwassers sowie von den Temperaturverhältnissen bestimmt (PLUM 2005). Insbesondere der Sauerstoffgehalt des Wassers ist entscheidend für die Überlebenschance von Bodentieren. So können im Sommer auftretende Überflutungen mit einem geringeren Gehalt an gelöstem Sauerstoff bei höheren Wassertemperaturen negativere Auswirkungen auf die Siedlungsdichte von Bodentieren haben als Überflutungen im Winter (PLUM 2005).

Um genauere Erkenntnisse zu gewinnen, welche Auswirkung eine Überflutung (ÜF) von bis zu einer Woche Dauer im Juni auf den Regenwurmbestand in landwirtschaftlich genutzten Flächen hat, wurden vier und sechzehn Monate nach dem Junihochwasser 2013 von der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft, Institut für Ökologischen Landbau, Bodenkultur und Ressourcenschutz, Untersuchungen durchgeführt. Ziel war es, die Individuendichte und Biomasse der Regenwürmer im Vergleich zu nicht überfluteten Ackerflächen zu erfassen und dabei auch mögliche Effekte einer Verunreinigung durch Heizöl

aufzuzeigen. Zudem sollten mögliche Einflüsse auf die Artenvielfalt und Artenzusammensetzung ermittelt werden. Wie reagieren die drei ökologischen Gruppen der Regenwürmer (Tab. 1), die Streubewohner, die flachgrabenden Mineralschichtbewohner und die Tiefgräber auf eine Überflutung?

Tab. 1: Ökologische Gruppen der Regenwürmer (verändert nach DUNGER 2008, Fotos: R. Walter)

		
<i>Lumbricus castaneus</i>	<i>Aporrectodea caliginosa</i>	<i>Lumbricus terrestris</i>
Streubewohner epigäische Arten	Flachgräber/Mineralschichtbewohner endogäische Arten	Tiefgräber anezische Arten
<ul style="list-style-type: none"> • dunkel pigmentierte Arten • leben oberflächennah in der Streu- und Humusaufgabe von vorzersetzer Streu • bilden keine oder nur temporäre Röhren • Schwerpunkt ihres Vorkommens liegt im Grünland und Wald 	<ul style="list-style-type: none"> • hell pigmentierte Arten • leben im Mineralboden bis ca. 60 cm Tiefe und graben ständig neue auch horizontale Röhren, die z.B. für eine gute Verteilung des infiltrierten Wassers im Wurzelraum sorgen • tragen zur Feindurchmischung von organischer Substanz mit dem Mineralboden bei 	<ul style="list-style-type: none"> • v.a. das Vorderende ist dunkel pigmentiert • legen nahezu senkrechte, tief in den Unterboden reichende stabile Röhren an, die sie mit ihrem Kot und Schleim austapezieren (luftführende und dränfähige Makroporen) • sammeln organisches Material an der Oberfläche ein, das sie in ihre Röhren ziehen und bis in den Unterboden einbringen

Nach dem Junihochwasser 2013 wurde die bayerische Hochwasserstrategie zu einem Hochwasserschutz Aktionsprogramm 2020plus ausgedehnt und neu aufgestellt (BAYERISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR UMWELT UND VERBRAUCHERSCHUTZ 2014). Neben einer Verbesserung der natürlichen Wasserrückhaltung in den Einzugsgebieten wird zukünftig auch der technische Hochwasserschutz weiter ausgebaut werden. So wurde 2014 die Planung von 12 Flutpoldern entlang der Donau bekanntgegeben (ÖSTREICHER & TREFFLER 2015), die bei Flusshochwasser gezielt geflutet werden können, um in flussabwärts gelegenen Flussabschnitten die Abflussscheitel zu senken. Flutpolder dienen somit als Überlastschutz bei extremen Hochwasserereignissen und können nach dem Hochwasserscheitel wieder abgelassen werden.

Bereits in den 50er Jahren wurde in Landshut als Hochwasserschutzanlage eine Flutmulde errichtet, die in den letzten Jahrzehnten mehrmals gezielt geflutet wurde. Um Auswirkungen von wiederkehrenden Überflutungen auf den Regenwurmbestand zu ermitteln wurden in der grünlandgeprägten Flutmulde Landshut Untersuchungen zum Bestand und zur Artenvielfalt der Regenwürmer durchgeführt (Kap. 6).

4 Heizölverunreinigung von landwirtschaftlichen Nutzflächen

4.1 Messungen der Mineralölkohlenwasserstoffe (MKW)

Beim Junihochwasser 2013 kam es in Niederalteich bei Deggendorf auch zum Auslaufen von Heizöltanks. Das Auspumpen der überfluteten und mit Öl belasteten Keller in angrenzende landwirtschaftliche Nutzflächen führte zu Anschwemmungen von öligem Material an der Bodenoberfläche. Nach Rückgang der Überflutung waren insbesondere in etwas tiefer gelegenen Mulden Vegetationsschäden deutlich erkennbar (Abb. 3). Die geschädigten Flächen waren meist nur wenige 100 Quadratmeter groß. Da die Effektivität und Geschwindigkeit des Abbaus von Mineralölkohlenwasserstoffen (MKW) von der Verfügbarkeit von Nährstoffen und Sauerstoff bestimmt wird (CHAINEAU et al. 2003), wurde nach dem Abtrocknen der mit Heizöl verunreinigten Flächen eine oberflächennahe Vertikutierung empfohlen. Sie sollte die Durchlüftung und mikrobielle Aktivität fördern und dadurch zu einem beschleunigten Abbau der MKW beitragen.



Abb. 3: Siedlungsnaher, mit Heizöl verunreinigter Bereich eines Klee grasackers (F-1, zur Lage siehe auch Abb. 5, Abb. 6) bei Niederalteich mit deutlich erkennbaren Vegetationsschäden im Juli 2013 (Foto: C. Müller).

Messungen zu den MKW-Gehalten auf einer mit Heizöl verunreinigten Klee grasfläche bei Niederalteich (Abb. 3) wurden am 18. Juli 2013 und am 05. November 2013 von Dr. Eiberweiser GeoConsult GmbH durch eine Rasterbeprobung mit Stechzylindern durchgeführt. Proben wurden jeweils in einer Bodentiefe von 0-2 cm und 2-5 cm genommen. Siedlungsfernere Ackerbereiche des Feldstücks ohne ersichtliche Vegetationsschäden wurden Anfang November 2013 auf MKW-Gehalte untersucht.

4.2 MKW-Gehalte 6 Wochen und 5 Monate nach der Verunreinigung

An der siedlungsnahen mit Heizöl verunreinigten Fläche (Abb. 3) wurde Mitte Juli 2013 ein stark erhöhter Gehalt an MKW von 5800 mg/kg Boden in einer Bodentiefe von 0-2 cm gemessen, während er in einer Tiefe von 2 bis 5 cm bereits unter der Bestimmungsgrenze von 50 mg/kg lag (Tab. 2). Von einer MKW-Verunreinigung durch Heizöl war somit nur die oberste Bodenzone betroffen, eine Verlagerung in tiefere Schichten konnte nicht nachgewiesen werden. Auch beim Pfingsthochwasser 1999 waren in Bayern MKW-Gehalte mit Werten bis über 3500 mg/kg Boden im obersten Bodenbereich gemessen worden. Nur in wenigen Fällen wurden geringe Gehalte auch in tieferen Bodenzonen festgestellt (SUTTNER et al. 2002).

Tab. 2: Mineralölkohlenwasserstoffgehalte (MKW) 6 Wochen und 5 Monate nach der Verunreinigung mit Heizöl beim Juni-Hochwasser 2013 (BG: Bestimmungsgrenze, Messungen durchgeführt von Dr. Eiberweiser GeoConsult GmbH)

	am 18. Juli 2013	am 5. November 2013
0-2 cm Tiefe	5800 mg/kg Boden	83 mg/kg Boden
2 bis 5 cm Tiefe	unter der BG von 50 mg/kg Boden	unter der BG von 50 mg/kg Boden

Bei der Nachbeprobung Anfang November 2013 war in Niederalteich der ursprünglich hohe MKW-Gehalt der verunreinigten Fläche in 0-2 cm Tiefe bereits auf einen Wert von 83 mg/kg abgesunken (Tab. 2). Messungen von siedlungsferner gelegenen Flächen des Klee grasackers - ohne ersichtliche Ölverunreinigung in der Vegetation nach dem Hochwasser - ergaben Anfang November 2013 keine nachweisbaren Belastungen durch Mineralölkohlenwasserstoffe.

Auch beim Pfingsthochwasser 1999 gingen im Verlauf weniger Wochen die MKW-Gehalte an den meisten Standorten deutlich zurück (SUTTNER 2002, Abb. 4). Nur an zwei von insgesamt 86 untersuchten Verdachtsstandorten konnten im Herbst 1999 noch MKW-Werte von mehr als 100 mg/kg Boden nachgewiesen werden. Auch bei den vom LfU beim Hochwasser 2013 an öligem, angeschwemmtem Sedimentmaterial durchgeführten Untersuchungen wurden im Frühjahr 2014 bei Wiederholungsmessungen nur mehr MKW-Werte zwischen 92 und 220 mg/kg gemessen (SCHILLING 2014). Kurz nach dem Hochwasser lagen die MKW-Werte auf diesen meist nur einige Quadratmeter großen Flächen zwischen 11.000 – 25.000 mg/kg Boden. Bei MKW-Werten unter 100 mg/kg Boden (= Z0-Wert nach LAGA-Merkblatt) ist davon auszugehen, dass relevante Schutzgüter nicht beeinträchtigt werden.

Die Ergebnisse bestätigen die schnelle Abbaubarkeit von Mineralölkohlenwasserstoffen in Böden unter atmosphärischen Bedingungen. Entscheidend hierfür ist eine intensive Belüftung z.B. durch eine oberflächennahe Vertikutierung und flache Durchmischung, die die biologische Aktivität anregt. Der schnelle Abbau von MKW ist wahrscheinlich auf eine

Vermehrung ölabbauender Mikroorganismen und ihre intensive Umsetzungsleistung zurückzuführen (CHAINEAU et al. 2003).

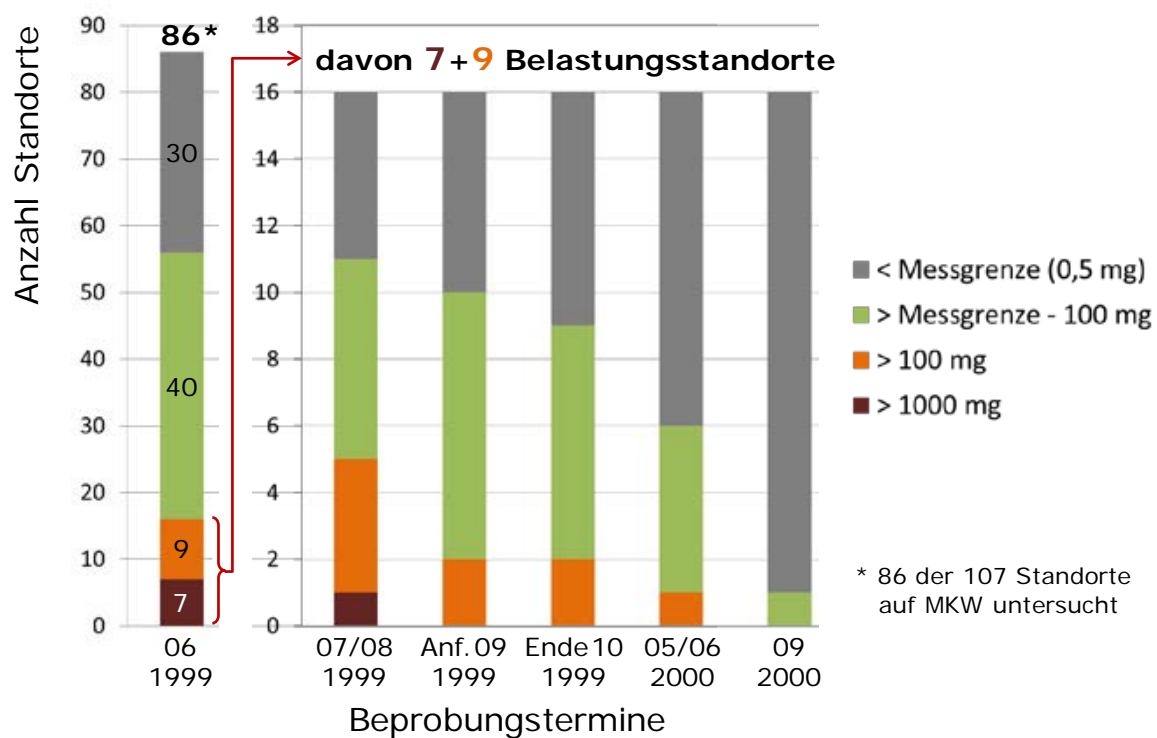


Abb. 4: Hochwasser 1999: Rückgang der MKW-Belastung in Südbayern (Suttner et al., 2002)

5 Junihochwasser 2013 – Auswirkungen auf Regenwürmer im Acker?

5.1 Untersuchungsflächen im Überflutungsgebiet Donauaue

Für die Regenwurmuntersuchung wurden Ackerflächen in der Donauaue bei Niederalteich im Landkreis Deggendorf ausgewählt (Abb. 5, Abb. 6), eine vom Junihochwasser 2013 besonders stark betroffene Region. Der Standort liegt 310 m ü. NN und ist durch die Hauptbodenart Lehm (Tab. 3) geprägt. Der Jahresniederschlag lag von 1989 bis 2014 durchschnittlich bei 772 mm und die Jahrestemperatur im Mittel bei 9,0°C (Station Uttenkofen, LfL Agrarmeteorologie). Als Untersuchungsflächen wurden sowohl konventionell als auch ökologisch bewirtschaftete Ackerflächen ausgesucht. Die angebauten Kulturen zum Zeitpunkt der Überflutung und zur Probennahme der Regenwürmer sind in Tab. 3 aufgeführt. Vier bis acht Tage lang und bis zu einer Höhe von 2,4 m betrug die Überstauung der beprobten Feldstücke beim Junihochwasser 2013 (Tab. 3). Als Kontrolle dienten jeweils nicht überflutete Ackerflächen mit ähnlicher Bewirtschaftung.



Abb. 5: Lage ausgewählter Untersuchungsstellen für Regenwürmer bei Niederalteich kurz nach dem Hochwasserscheitel am 5. Juni 2013 (Luftbild: Agroluftbild, W. Bauer), Erläuterungen zu den Untersuchungsflächen siehe Tab. 3 und Abb. 6

Für die mit Heizöl verunreinigte Probennahmestelle F-1_{+Öl} dienten zwei siedlungsf fernere Teilbereiche desselben Feldstücks ohne erkennbare Ölverunreinigung als Vergleichsflächen (F-2 und F-3).



Abb. 6: Lage der Untersuchungsflächen bei Niederalteich zur Erfassung des Regenwurmbestandes

blau: überflutete Äcker

grün: nicht überflutete Äcker

orange: überflutete Fläche zusätzlich mit Heizöl verunreinigt

konv.: konventionelle Bewirtschaftung

öko: ökologische Bewirtschaftung

Tab. 3: Charakterisierung der Untersuchungsflächen in Niederalteich, Anzahl überfluteter Tage und angebaute Kulturen während der Überflutung (ÜF) im Juni 2013 und zum Zeitpunkt der Regenwurmprobenahme im Oktober 2013 (konv.: konventionelle Bewirtschaftung, öko: ökologische Bewirtschaftung, + Öl: mit Heizöl verunreinigt)

Feldstücke	Bodenschätzung	Bodenart	Überflutete Tage im Juni 2013	Angebaute Kultur	
				bei ÜF: Juni 2013	zur Beprobung: Okt. 2013
A _{konv.}	LT4A1 57/54	schwerer Lehm	0 (Kontrolle)	Winterweizen	Zwischenfrucht
B _{konv.}	sL4A1 56/52	sandiger Lehm	6	Winterweizen	Zwischenfrucht
C _{konv.}	sL3A1 65/58	sandiger Lehm	8	Winterweizen	Zwischenfrucht
D _{öko} ¹	L3A1 76/71	Lehm	0 (Kontrolle)	Winterweizen	Zwischenfrucht
E _{öko}	L3A1 78/73	Lehm	4	Klee gras	Klee gras
F-1 _{öko + Öl} ¹			4	Klee gras	Klee gras
F-2 _{öko} ¹	L3A1 76/71	Lehm	4	Klee gras	Klee gras
F-3 _{öko}			4	Klee gras	Klee gras
G _{öko}	L3A1 73/69	Lehm	7	Winterweizen	Zwischenfrucht

¹ Probestellen wurden im Oktober 2014 unmittelbar nach der Körnermisernte erneut beprobt

5.2 Methode der Regenwurmerfassung

Die Probennahmen zur Erfassung der Individuendichte, Biomasse und Artenvielfalt der Regenwürmer im Überflutungsgebiet der Donau bei Niederalteich fanden am 8., 9. und 10. Oktober 2013 vier Monate nach dem Hochwasserereignis statt. Je Feldstück wurden sechs Stichproben genommen. Im Feldstück F wurden aufgrund der Ölverunreinigung auf einer siedlungsnahen Fläche (F-1_{+Öl}) zwei weitere Teilbereiche ohne ersichtliche Ölverunreinigung (F-2 und F-3) auch mit jeweils 6 Stichproben untersucht. Dabei erfolgte zuerst eine Austreibung der Regenwürmer mit einer stark verdünnten 0,2 prozentigen Formaldehydlösung, die verteilt auf zwei Gaben (insgesamt 40 l/m²) auf eine 0,5 Quadratmeter große Probefläche je Stichprobe aufgegossen wurde. Nach jeder Gabe wurden die ausgetriebenen Regenwürmer über mindestens 15 Minuten Dauer eingesammelt. Danach wurde ein Teil der Probestelle (1/10 m²) zirka 30 Zentimeter tief (Ap-Horizont) ausgegraben. Das Bodenmaterial wurde von Hand zerkrümelt und nach Regenwürmern durchsucht (Abb. 7).

Die Anwendung einer Austreibungsmethode kombiniert mit einer Handauslese ist für eine gute Bestandserfassung der Regenwürmer unerlässlich (EHRMANN & BABEL 1991, FRÜND & JORDAN 2003, PELOSI et al. 2009).

Eine repräsentative Probennahme der Regenwürmer unmittelbar nach dem Hochwasser im Juni/Juli 2013 war nicht möglich, da in wassergesättigten Böden keine Austreibung der Regenwürmer durchgeführt werden kann und sich die Regenwürmer nach der Abtrocknung der Flächen wegen den anschließend sehr rasch steigenden Temperaturen in tiefere Schichten zurückzogen und in die sommerliche Ruhephase (Diapause) begaben.

Um die weitere Entwicklung des Regenwurmbestands zu beobachten, wurden drei Probestellen bei Niederalteich ($D_{\text{öko}}$, $F-1_{\text{öko}}$, $F-2_{\text{öko}}$) 16 Monate nach der Überflutung im Oktober 2014 erneut mit derselben Methode beprobt. Ziel war es, dabei insbesondere langfristige Veränderungen auf der mit Heizöl verunreinigte Fläche $F-1_{\text{öko}}$ zu erfassen. Die Nachbeprobung der drei Flächen erfolgte am 14.10.2014 unmittelbar nach der Körnermaisernte vor der Bodenbearbeitung (Abb. 7).



Abb. 7: Regenwurmprobennahme vier Monate nach der Überflutung im Oktober 2013 bei Niederalteich in der Zwischenfrucht (links) und im Klee gras (Mitte) sowie im Oktober 2014 im abgeernteten Körnermaiefeld (rechts) (Fotos: R. Walter)

5.3 Regenwurmbestand vier Monate nach dem Junihochwasser 2013

Die beiden nicht überfluteten Kontrolläcker in der Donauaue bei Niederalteich wiesen im Oktober 2013 mit ca. 90 Individuen pro Quadratmeter eine für bayerische Äcker durchschnittliche Individuendichte auf (WALTER & BURMEISTER 2013). Auf den fünf überfluteten Äckern variierte vier Monate nach der Überflutung die erfasste Bestandszahl sehr stark von knapp 7 Individuen/m² bis zu 200 Individuen/m² (Abb. 8). Drei überflutete Ackerflächen unterschieden sich mit Werten zwischen knapp 70 bis 125 Individuen/m² nicht wesentlich von den Kontrollflächen bzw. lagen im Bereich der natürlichen Schwankungen, z.B. aufgrund kleinräumiger, standortsbedingter Unterschiede. Eine Ackerfläche ($G_{\text{öko}}$), die bis zu einer Höhe von 2,4 m sieben Tage lang überstaut war, wies mit 200 Individuen pro Quadratmeter eine deutlich höhere Individuendichte und Biomasse der Regenwürmer auf. Dieses Feldstück erhielt nach der Überflutung eine organische Düngergabe mit Gär-

resten. Zudem können dort auch lokal günstigere Standortbedingungen z.B. eine höhere Bodenfeuchtigkeit, sich positiv auf die Regenwürmer ausgewirkt haben.

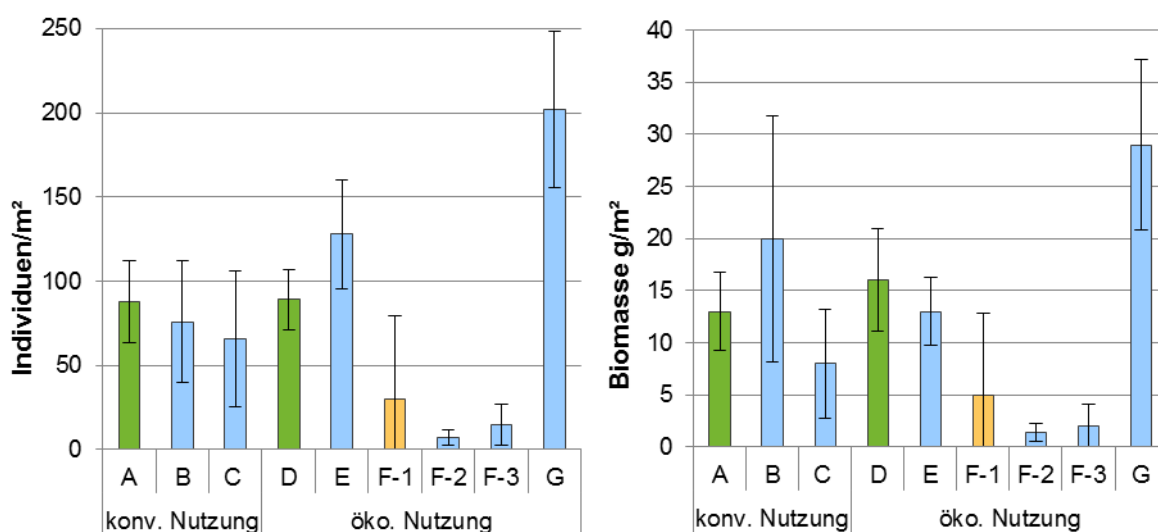


Abb. 8: Durchschnittliche Individuendichte und Biomasse der Regenwürmer von überfluteten Äckern (blau) und einer zusätzlich mit Heizöl verunreinigten Ackerfläche (orange) im Vergleich zu nicht überfluteten Äckern (grün) bei Niederaltich im Oktober 2013 vier Monate nach dem Junihochwasser (Mittelwerte mit Standardabweichung, jeweils n=6 Stichproben, konv. Nutzung: konventionelle Bewirtschaftung, öko. Nutzung: ökologische Bewirtschaftung)

Insgesamt lassen somit vier von fünf Ackerflächen vier Monate nach ihrer Überflutung keine größeren Beeinträchtigungen in ihrem Regenwurmbestand erkennen, die auf das Juni-Hochwasser 2013 zurückgeführt werden könnten. Dies bestätigt, dass Regenwürmer Überlebensstrategien haben, ein mehrere Tage andauerndes Hochwasser zu überstehen (AUSDEN et al. 2001, PLUM 2005, DUNGER 2008). Die nach dem Hochwasser an der Bodenoberfläche auftretenden toten Regenwürmer im Untersuchungsgebiet bei Deggendorf umfassten wahrscheinlich nur einen kleinen Teil des Regenwurmbestandes, der im Herbst nicht mehr quantifizierbar war, zumal nach dem Junihochwasser 2013 eine langanhaltende Sommertrockenheit folgte, die ebenfalls zur Verringerung von Regenwurmsiedlungsdichten führen kann (EHRMANN 2012b). Beispielsweise war in einem Gleyboden an der Elbe in Norddeutschland der Einfluss der Sommertrockenheit im Jahr 2003 auf Regenwürmer ausgeprägter als zuvor das Sommerhochwasser 2002 (PLUM & FILSER 2005).

Nur auf einer der fünf überfluteten Ackerflächen wurde in allen drei untersuchten Teilbereichen (F-1, F-2, F-3) des mehrere Hektar großen Feldstückes mit 7-30 Individuen/m² ein sehr geringer Regenwurmbestand festgestellt. Sowohl die Individuendichte als auch die Biomasse lag hier durchschnittlich um ca. 80 % niedriger als im Boden der ähnlich bewirtschafteten Kontrollfläche. Da allerdings nur einer der drei Teilbereiche (F-1+öl) mit Heizöl verunreinigt wurde, können die in allen drei Teilbereichen der Ackerfläche erfassten niedrigen Bestandszahlen der Regenwürmer nicht auf die Verunreinigung durch Heizöl zurückgeführt werden. Vielmehr müssen andere Faktoren wie Standortbedingungen, größerer Grundwasserflurabstand und eine stärkere Austrocknung der Fläche in dem sehr trockenen Sommer nach dem Hochwasser als mögliche Ursache in Betracht gezogen wer-

den, zumal die Bodenfeuchte wesentlich die Individuendichte und Artenzusammensetzung von Regenwürmern beeinflusst (VOLZ 1976). Eventuell konnten aufgrund der Sommertrockenheit die Tiere auch unzureichend erfasst worden sein, da sie sich möglicherweise noch in der sommerlichen Diapause befanden bzw. in tieferen Bodenschichten aufhielten.

Zu berücksichtigen gilt es dennoch, dass bereits bei deutlich geringeren MKW-Werten, als hier im Untersuchungsgebiet nachgewiesen, toxische Effekte auf Regenwürmer in Laborversuchen sowohl bei Vermeidungstests als auch in ihrer Reproduktion (Anzahl Kokons und Jungtiere) festgestellt wurden (SCHAEFER 2003).

Alle fünf überfluteten Ackerflächen wiesen eine ähnlich hohe Artenvielfalt der Regenwürmer wie die Kontrolläcker auf. Dies trifft auch für den Anteil der noch nicht geschlechtsreifen Jungtiere zu, der bei 50 bis 75 % lag. Nachgewiesen wurden allerdings nur streubewohnende (epigäische) sowie flachgrabende (endogäische), im Wurzelbereich des Oberbodens lebende Arten (Tab. 4, Tab. 5).

Tab. 4: Individuendichte (Individuen/m²) der Regenwurmarten im Oktober 2013 vier Monate nach der Überflutung im Vergleich zu nicht überfluteten Kontrollflächen (A_{konv} , $D_{öko}$) in Niederalteich (Mittelwerte, $n=6$)

	A _{konv}	B _{konv}	C _{konv}	D _{öko}	E _{öko}	F-1 _{öko+Öl}	F-2 _{öko}	F-3 _{öko}	G _{öko}
Juvenile									
<i>Lumbricus spec.</i>	2,7	8,7	0,7						9,3
Sonstige Juvenile	48,3	37,3	45	45,7	97,3	20,7	2,3	9,3	101,3
Adulte Streubewohner									
<i>Lumbricus rubellus</i>	3,3	0,3							
<i>Aporrectodea handlirschii</i>					1,7				15,7
<i>Dendrobaena rubidus</i>	1,7								
Adulte Flachgräber									
<i>Aporrectodea caliginosa</i>	22	18,3	6,3	24	23	3	0,3	0,3	38
<i>Aporrectodea rosea</i>	5,3	1,6	7,3	10	3	0,3	4,7	5,3	10
<i>Allolobophora chlorotica</i>	4,3	5,0		9,3	3,3	6,3			28
<i>Octolasion lacteum</i>		1,3	0,3						
<i>Proctodrilus tuberculatus</i>		3,3	6,7						
Gesamtsumme	87,7	76	66,3	89	128,3	30,3	7,3	15	202,3
Artenzahl	5	6	4	3	4	3	2	2	4

Die am häufigsten und stetigsten im Untersuchungsgebiet vorkommenden Arten sind *Aporrectodea caliginosa*, *Aporrectodea rosea* sowie *Allolobophora chlorotica*. Alle drei Arten sind häufige und weit verbreitete, flachgrabende Arten in bayerischen Äckern. Ihre mögliche Überlebenszeit unter Wasser umfasst mehrere Wochen bis zu mehreren Monaten (AUSDEN et al. 2001), so dass sie zu den am konstantesten nach Überflutungen auftretenden Arten zählen (PLUM 2005). Eine Kennart von häufig überfluteten Standorten in der Aue ist *Allolobophora chlorotica*, sowohl am Rhein (VOLZ 1976, ZORN et al. 2005) als

auch an der Elbe (HÖSER 2005). Sie bevorzugt die tiefer gelegenen Flächen der Hartholz-
 aue oder die flussnahe Weichholzaue, die reich an organischer Substanz sind (HÖSER
 2005) und ist tolerant gegenüber feuchten Bedingungen (ZORN et al. 2005). Dagegen be-
 siedeln *Aporrectodea caliginosa* und *Aporrectodea rosea* in Auen die von der Auendyna-
 mik geprägten flussnahen Standorte der Hartholzaue (HÖSER 2005). Mit *Aporrectodea*
handlirschii und *Proctodrilus tuberculatus* kommen zwei für bayerische Äcker seltene Ar-
 ten vor. Als typische Art von Auen, die dort grundwasserfernere Standorte der Auenter-
 rasse und des Uferwalls besiedelt, gilt *Proctodrilus tuberculatus* (HÖSER 2003, HÖSER
 2005). Ihr Vorkommen weist auf fossile, an der aktuellen Auenoberfläche kaum noch er-
 kennbare Auerinnen hin (HÖSER 2008).

Tab. 5: Biomasse (g/m²) der Regenwurmart in Oktober 2013 vier Monate nach der
 Überflutung im Vergleich zu nicht überfluteten Kontrollflächen (A_{konv}, D_{öko}) in
 Niederaltich (Mittelwerte, n=6)

	A _{konv}	B _{konv}	C _{konv}	D _{öko}	E _{öko}	F-1 _{öko+Öl}	F-2 _{öko}	F-3 _{öko}	G _{öko}
Juvenile									
<i>Lumbricus spec.</i>	0,1	6,2	0,01						0,3
Sonstige Juvenile	3,5	4,2	3,5	5,4	6,9	2,5	0,3	0,4	9,3
Adulte Streubewohner									
<i>Lumbricus rubellus</i>	1,5	0,3							
<i>Aporrectodea handlirschii</i>					0,6				4,2
<i>Dendrobaena rubidus</i>	0,1								
Adulte Flachgräber									
<i>Aporrectodea caliginosa</i>	5,8	6,1	1,6	6,9	4,9	0,8	0,1	0,2	9,2
<i>Aporrectodea rosea</i>	0,8	0,3	1,7	1,6	0,4	0,04	1,1	1,3	1,9
<i>Allolobophora chlorotica</i>	0,7	0,9		1,8	0,6	1,3			4,2
<i>Octolasion lacteum</i>		1,2	0,2						
<i>Proctodrilus tuberculatus</i>		0,5	0,6						
Gesamtsumme	12,5	19,8	7,7	15,5	13,4	4,6	1,4	1,9	29,0

Auffallend war, dass in allen untersuchten Äckern in Niederaltich keine tiefgrabende
 (anezische) Regenwurmart nachweisbar war, auch nicht der in Bayern weit verbreitete
 Tauwurm *Lumbricus terrestris*. Dies ist der Grund für ein insgesamt vergleichsweise nied-
 riges Niveau der Regenwurmbiomasse (Tab. 5). Sowohl in den überfluteten Äckern als
 auch in den beiden Kontrolläckern kam keine tiefgrabende Regenwurmart vor. Das Fehlen
 dieser Lebensform kann daher nicht auf das Hochwasserereignis im Juni 2013 zurückge-
 führt werden. Vielmehr bestätigt sich eine entlang der Donau zwischen Deggendorf und
 Passau auf mehreren Boden-Dauerbeobachtungsflächen im Acker seit 1985 beobachtete
 Verbreitungslücke des Tauwurms *Lumbricus terrestris*. Diese lässt sich möglicherweise
 auf eine historisch häufigere und intensivere Überflutung der Donauaue in diesem Gebiet
 zurückführen. Obwohl die tiefgrabende Art *Lumbricus terrestris* Überflutungen mit flie-
 bendem, sauerstoffreichen Wasser überstehen kann, meidet sie durchnässte, phasenweise

luftarme Böden (GRAEFE 1998, WILKENS 2002) und legt ihre senkrechten Wohnröhren in gut belüfteten, wasserungesättigten Böden an. In Auen kennzeichnet *Lumbricus terrestris* somit Bereiche mit relativ hohem Grundwasserflurabstand (HÖSER 2003, HÖSER 2005, WILKENS 2002).

In einer ca. 10 km südlich von Niederalteich gelegenen Acker-Boden-Dauerbeobachtungsfläche wurde über drei Bestandserhebungen zwar kein *Lumbricus terrestris*, aber mit *Lumbricus polyphemus* eine in Bayern auf landwirtschaftlichen Nutzflächen sehr seltene andere tiefgrabende Regenwurmart nachgewiesen.

5.4 Regenwurmbestand sechzehn Monate nach dem Junihochwasser 2013

Die Nachbeprobung in Niederalteich im Oktober 2014, sechzehn Monate nach der Überflutung zeigte in allen drei untersuchten Flächen eine positive Entwicklung des Regenwurmbestandes (Tab. 6). Während sich die Individuendichte auf der nicht überfluteten Kontrollfläche mehr als verdoppelte, wurde auf den beiden überfluteten Flächen sogar eine Verzehnfachung festgestellt. Die stärksten Zunahmen in der Siedlungsdichte waren für alle drei Ackerflächen bei den juvenilen, noch nicht geschlechtsreifen Jungtieren feststellbar. Deshalb fiel der Anstieg in der Biomasse der Regenwürmer (Tab. 7) etwas geringer aus als bei der Individuendichte (Tab. 6). Dennoch führte bei der Art *Aporrectodea caliginosa* die Zunahme der Siedlungsdichte adulter Individuen auch zu einem deutlichen Anstieg in ihrer Biomasse.

Tab. 6: Individuendichte (Individuen/m²) der Regenwurmartens vier (Okt. 2013) und sechzehn (Okt. 2014) Monate nach der Überflutung im Vergleich zu einer nicht überfluteten Kontrollfläche ($D_{\text{öko}}$) in Niederalteich (Mittelwerte, $n=6$)

	$D_{\text{öko}}$		F-1 _{öko + Öl}		F-3 _{öko}	
	2013	2014	2013	2014	2013	2014
Juvenile						
<i>Lumbricus spec.</i>				21,7		1,7
Sonstige Juvenile	45,7	151	20,7	239,3	9,3	104,7
Adulte Streubewohner						
<i>Lumbricus castaneus</i>				3,3		
<i>Aporrectodea handlirschii</i>		0,7		0,3		0,3
Adulte Flachgräber						
<i>Aporrectodea caliginosa</i>	24	35,7	3	22,7	0,3	11,3
<i>Aporrectodea rosea</i>	10	4,7	0,3	10,7	5,3	14,3
<i>Allolobophora chlorotica</i>	9,3	8	6,3	16,3		1
Gesamtsumme	89	200	30,3	314,3	15	133,3
Artenzahl	3	4	3	5	2	4

In allen drei im Oktober 2014 untersuchten Feldstücken wurde auch eine höhere Artenzahl der Regenwürmer als 2013 festgestellt. Dabei handelt es sich allerdings wieder ausschließlich um streubewohnende (epigäische) und flachgrabende (endogäische) Arten. Von Herbst 2013 bis Herbst 2014 waren die Witterungsbedingungen für die Entwicklung der Regenwürmer günstig (keine längere Frostperiode im Winter 2013/2014 und überwiegend gute Feuchtigkeitsbedingungen) und die hohe Anzahl juveniler Tiere im Oktober 2014 weist auf eine gute Reproduktionsrate hin. Dennoch deutet die starke Erhöhung des Regenwurmbestandes innerhalb nur eines Jahres und der Anstieg in der Artenzahl darauf hin, dass dies nicht ausschließlich über eine Vermehrung der Regenwürmer erfolgte. Vielmehr wird angenommen, dass sich im Oktober 2013 ein Teil der Arten und/oder Population aufgrund der vorangegangenen Sommertrockenheit noch in tiefere Bodenschichten in der sommerlichen Diapause oder im Kokonstadium (widerstandsfähiges Stadium zum Überdauern von ungünstigen Bedingungen) befanden und somit mit der Erfassungsmethode nicht nachweisbar waren. Dies trifft wahrscheinlich in besonderem Maße für das Feldstück F zu.

Tab. 7: Biomasse (g/m²) der Regenwurmartens vier (Okt. 2013) und sechzehn (Okt. 2014) Monate nach der Überflutung im Vergleich zu einer nicht überfluteten Kontrollfläche (D_{öko}) in Niederalteich (Mittelwerte, n=6)

	D _{öko}		F-1 _{öko + Öl}		F-3 _{öko}	
	2013	2014	2013	2014	2013	2014
Juvenile						
<i>Lumbricus spec.</i>				1,3		0,1
Sonstige Juvenile	5,4	7,0	2,5	8,7	0,4	3,5
Adulte Streubewohner						
<i>Lumbricus castaneus</i>				0,5		
<i>Aporrectodea handlirschii</i>		0,3		0,2		0,1
Adulte Flachgräber						
<i>Aporrectodea caliginosa</i>	6,9	12,4	0,8	9,3	0,2	3,9
<i>Aporrectodea rosea</i>	1,6	0,7	0,04	2,0	1,3	3,3
<i>Allolobophora chlorotica</i>	1,8	2,0	1,3	2,1		0,3
Gesamtsumme	15,6	22,3	4,6	24,1	1,9	11,1

Die überdurchschnittlich hohe Siedlungsdichte der Regenwürmer mit über 300 Individuen/m² im Boden des mit Heizöl verunreinigten Ackerbereiches im Oktober 2014, lässt auch 16 Monate nach der Überflutung keine ungünstigen Auswirkungen der Ölverunreinigung auf die Regenwürmer erkennen. Dass die Regenwürmer die Heizölverunreinigung so unbeschadet überstanden haben, ist wahrscheinlich darauf zurückzuführen, dass sich die MKW-Verunreinigung auf die oberen 2 cm des Bodens beschränkte und keine Verlagerung in tiefere Bodenschichten erfolgte. Günstig für Regenwürmer war zudem, dass die Verunreinigung im Sommer während ihrer Ruhephase auftrat, wenn die Tiere sich in tiefere Bodenschichten zurückziehen und dass der hohe Mineralölkohlenwasserstoffgehalt in-

nerhalb weniger Monate abgebaut wurde (Kap. 4). Verantwortlich für den schnellen Abbau der MKW war wahrscheinlich eine intensive mikrobielle Umsetzung (CHAINEAU et al. 2003), die durch eine verbesserte Verfügbarkeit von Sauerstoff aufgrund einer oberflächennahen Vertikutierung angeregt wurde.

Zudem ist auch ein positiver Beitrag von Regenwürmern beim Abbau von MKW-Verbindungen möglich. In Containerversuchen war nach 28 Tagen, abhängig von der zugegebenen Regenwurmart, eine um 10 bis 40% stärkere Abnahme des MKW (engl. TPH total petroleum hydrocarbon) – Gehaltes als ohne Regenwürmer feststellbar (SCHAEFER et al. 2005). In Anwesenheit von Regenwürmern wurde auch eine signifikant gesteigerte Bodenatmung gemessen, sowie bei zwei von drei untersuchten Regenwurmartensorten eine signifikante Zunahme der mikrobiellen Biomasse (SCHAEFER et al. 2005). Wahrscheinlich stimulieren Regenwürmer durch ihre nährstoffreichen Ausscheidungen sowie durch ihre Grabaktivität, die positiv auf das luftführende Porensystem im Boden und zur Durchmischung von organischer Substanz mit Mineralbodenteilchen beiträgt, die mikrobielle Aktivität im Boden und können so einen positiven Einfluss auf den Abbau von Mineralölkohlenwasserstoffen ausüben. Im Untersuchungsgebiet in Niederalteich ist allerdings der Einfluss von Regenwürmern auf den Abbau von MKW eher als gering einzustufen, da zum Zeitpunkt des Auftretens der Ölverunreinigung im Sommer viele Regenwürmer aufgrund von Trockenheit und Wärme nicht aktiv waren (Ruhephase). Zudem wurde im Untersuchungsgebiet der Tiefgräber *Lumbricus terrestris* nicht nachgewiesen, eine Art, die die mikrobielle Biomasse besonders positiv beeinflusst (SCHAEFER et al. 2005).

6 Regelmäßige Überflutungen von Grünland in der Flutmulde Landshut – Auswirkungen auf Regenwürmer?

6.1 Untersuchungsflächen

Von 1948 bis 1955 wurde in Landshut als Hochwasserschutzanlage eine Flutmulde errichtet, um die Innenstadt vor Überflutungen durch die Isar zu bewahren. Bei Hochwasser wird ein Teil des Abflusses in der sieben Kilometer langen Flutmulde um den Stadtkern herumgeleitet (Abb. 9). Pro Sekunde kann die Flutmulde bis zu 400 m³ Wasser durchlassen (<http://www.wwa-la.bayern.de/hochwasser/hochwasserschutzprojekte/flutmulde/index.htm>).

Der Standort ist durch einen Kalkpaternia aus Carbonatsandkies (Auensediment) mit einem durchschnittlichen Jahresniederschlag von 750 mm (langjähriges Mittel) gekennzeichnet und liegt auf 390 m ü. NN. Durch die grünlandgeprägte Flutmulde (Abb. 12) fließt die Pfettrach, die seit 1986 von einem geradlinigen zu einem mäandrierenden Verlauf umgestaltet wird. Um eine Eutrophierung der Pfettrach zu vermeiden, werden die Grünlandflächen der Flutmulde nicht organisch gedüngt, nur zwei- bis dreimal im Jahr gemäht und das Schnittgut abgefahren. Die ökologische Aufwertung der Flutmulde führte auch zu einer zunehmenden Nutzung der Flutmulde als Erholungsraum.



Abb. 9: Flutmulde Landshut und Lage der beiden auf den Regenwurmbestand im Oktober 2014 untersuchten Grünlandflächen (Kartengrundlage: Bayerische Vermessungsverwaltung 2015)

Über jeweils mehrere Tage andauernde Flutungen der Flutmulde erfolgten in den letzten Jahrzehnten im Juni 1979, im Mai 1999, im August 2005 und zuletzt im Juni 2013 (Abb. 10; Abb. 11). Die Grünlandflächen wurden dabei bis zu einer Höhe von ca. 1,5 m geflutet.

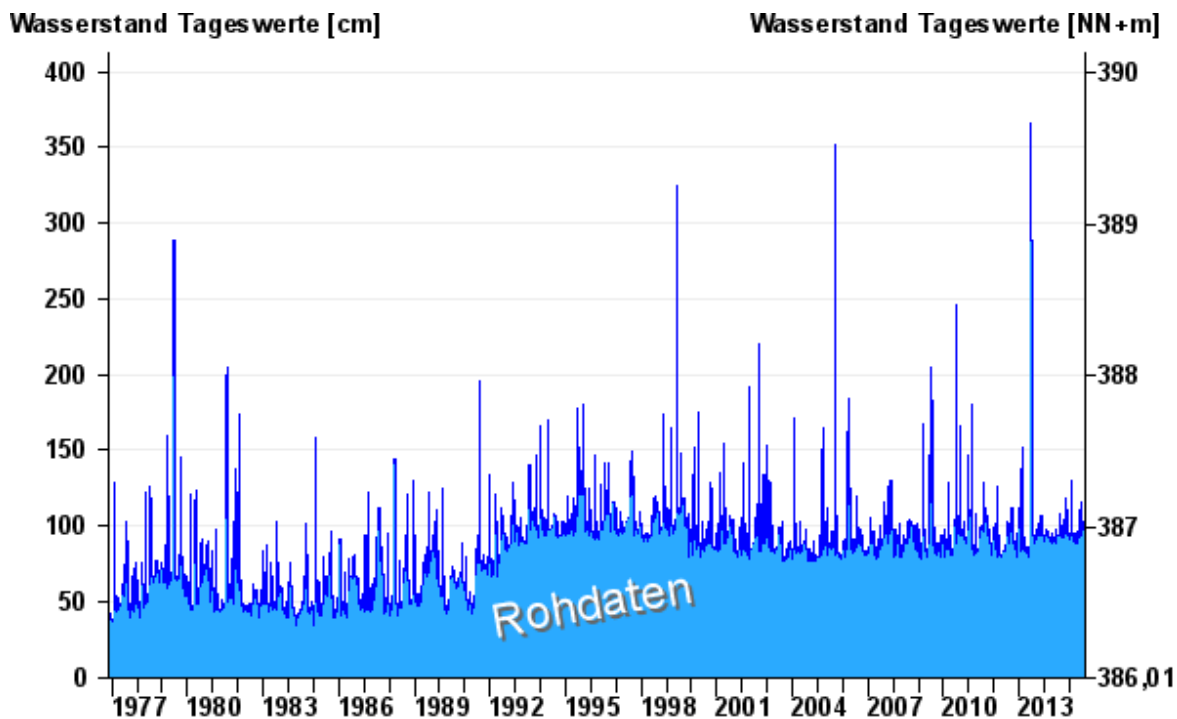


Abb. 10: Pegelstände der Pfettrach in der Flutmulde Landshut, Flutungen der Flutmulde fanden im Juni 1979, im Mai 1999, im August 2005 und im Juni 2013 statt. (Quelle: <http://www.hnd.bayern.de/pegel/wasserstand/>)



Abb. 11: Blick in die geflutete Flutmulde Landshut beim Hochwasser 2013 (Foto: R. Brandhuber, 4.6.2013)



Abb. 12: Flutmulde Landshut ohne Überflutung (Foto: R. Brandhuber 14.11.2015)

6.2 Methode der Regenwurmerfassung

Am 22. Oktober 2014, sechszehn Monate nach der letzten Flutung, wurden in der Flutmulde Landshut zwei Grünlandflächen auf ihren Regenwurmbestand untersucht (Abb. 9). Die Regenwurmerfassung erfolgte mit jeweils fünf Stichproben je Feldstück durch eine Methodenkombination (Abb. 13). Zuerst wurden die Regenwürmer mit einer stark verdünnten 0,2 prozentigen Formaldehydlösung ausgetrieben, die verteilt auf zwei Gaben (insgesamt 40 l/m²) auf eine 0,25 Quadratmeter große Probefläche je Stichprobe aufgegossen wurde. Die an der Bodenoberfläche erscheinenden Regenwürmer wurden über mindestens 30 Minuten Dauer eingesammelt. Um einen guten Erfassungsgrad zu erzielen fand anschließend eine Handauslese statt. Dafür wurde ein Teil der Probestelle (1/16 m²) zirka 30 Zentimeter tief ausgegraben, das Bodenmaterial von Hand zerkrümelt und nach Regenwürmern durchsucht. Die eingesammelten Tiere wurden in Ethanol konserviert und im Labor gezählt, gewogen und die adulten, also geschlechtsreifen Tiere auf ihre Art bestimmt.



Abb. 13: Regenwurmprobenahme in der Flutmulde Landshut im Oktober 2014 (Foto: R. Walter)

6.3 Regenwurmbestand in der Flutmulde Landshut

In beiden Grünlandflächen der Flutmulde in Landshut wurde mit über 400 Individuen/m² ein überdurchschnittlich hoher Regenwurmbestand festgestellt (Tab. 8). Im Mittel liegt die Siedlungsdichte der Regenwürmer für Grünland in Bayern bei ca. 250 Individuen/m². Auch die Gesamtbiomasse der Regenwürmer, die ein Maß für die funktionalen Leistungen der Regenwürmer im Boden ist, liegt im Mittel der beiden Untersuchungsflächen etwas über dem Durchschnitt für Grünlandflächen in Bayern.

Tab. 8: Individuendichte und Biomasse der Regenwürmer von zwei Grünlandflächen der Flutmulde in Landshut im Oktober 2014, sechzehn Monate nach der letzten Flutung (Mittelwerte, n=5)

	Individuen/m ²		Biomasse g/m ²	
	Grünland 1	Grünland 2	Grünland 1	Grünland 2
Juvenile				
<i>Lumbricus spec.</i>	113,6	110,4	32	40
Sonstige Juvenile	208,8	167,2	31,1	34,2
Adulte Streubewohner				
<i>Lumbricus rubellus</i>	11,2	9,6	3,6	3,5
Adulte Flachgräber				
<i>Aporrectodea caliginosa</i>	51,2	90,4	20,6	40,5
<i>Aporrectodea rosea</i>	15,2	28	1,8	4,3
<i>Aporrectodea georgii</i>	-	0,8	-	0,2
<i>Octolasion lacteum</i>	16,8	8,8	14,8	7,1
<i>Proctodrilus tuberculatus</i>	-	3,2	-	0,1
Adulte Tiefgräber				
<i>Lumbricus terrestris</i>	15,2	15,2	33,1	32,5
<i>Fitzingeria platyura</i>	0,8	11,2	1,9	19
Gesamtsumme	432,8	444,8	139	181,7

Die Ergebnisse zeigen, dass regelmäßig wiederkehrende Überflutungen der Flutmulde im Sommer zumindest längerfristig keine negativen Auswirkungen auf den Regenwurmbestand hatten. Dafür spricht auch die große Artenvielfalt der Regenwürmer. Besonders erwähnenswert ist das Vorkommen von drei im Grünland in Bayern selten auftretenden Regenwurmarten *Aporrectodea georgii*, *Proctodrilus tuberculatus* und *Fitzingeria platyura*, die nahezu ausschließlich auf der Grünlandfläche 2 nahe der Pfettrach vorkamen. Da die Pfettrach regelmäßig im Winter über die Ufer tritt, zeigt sich, dass die Nähe eines Flusses mit häufigeren kleineren Überflutungen im Winter und Sedimentzufuhr sich sogar günstig auf Regenwürmer und ihre Vielfalt auswirken können (siehe auch KEPLIN et al. 1995, HÖSER 2003). Während *Aporrectodea georgii* und *Proctodrilus tuberculatus* zwei endogäisch lebende Regenwurmarten sind, trat mit *Fitzingeria platyura*, neben *Lumbricus terrestris* sogar eine zweite tiefgrabende (anezische) Art in der Flutmulde auf.

Alle drei Lebensformen der Regenwürmer (epigäische, endogäische und anezische Arten) können also mehrere Tage andauernde Überflutungen im Sommer überstehen. Auch die am empfindlichsten auf eine Überflutung reagierenden tiefgrabenden Arten (PLUM 2005) haben Strategien, Hochwasserereignisse, wie sie in der Flutmulde Landshut in den letzten Jahrzehnten mehrmals auftraten (Abb. 10), zu überleben. Entscheidend ist offensichtlich, insbesondere für die Tiefgräber, dass es sich hierbei um fließendes Wasser mit ausreichendem Sauerstoffgehalt handelt (GRAEFE 1998).

7 Anpassungsstrategien von Regenwürmern Überschwemmungen zu überdauern und ihre Grenzen

7.1 Anpassungsstrategien der Regenwürmer

Viele Regenwurmart, deren Hauptaktivität im Frühjahr und Herbst bei mäßigen Bodentemperaturen und feuchten Bodenbedingungen liegt, können also Überschwemmungen von landwirtschaftlichen Nutzflächen im Sommer bis zu einer Woche gut überdauern. Regenwürmer haben hierfür, wie auch Insektenlarven, mehrere Überlebensstrategien entwickelt (PLUM 2005), beispielsweise vertikal tiefer in den Boden abzuwandern oder auch physiologische Anpassungen. Die über die Haut atmenden Tiere besitzen ein Atmungspigment mit einer hohen Sauerstoffaffinität, so dass sie auch Sauerstoff bei niedrigem Sauerstoffpartialdruck aus dem Wasser aufnehmen können. Das widerstandsfähigste Stadium der Regenwürmer ist das Kokonstadium (Abb. 14). Insbesondere die Streubewohner (epigäische Arten) überstehen unwirtliche Phasen in diesem Stadium. Eine Reduzierung ihrer Siedlungsdichte nach einer Überflutung kann z.B. von *Lumbricus rubellus* durch die überlebenden Kokons und einen kurzen Lebenszyklus schnell wieder ausgeglichen werden (ZORN et al. 2005). Insbesondere nach einer unregelmäßig auftretenden Überflutung wird der ohnehin schon vergleichsweise kurze Lebenszyklus dieser streubewohnenden Art durch eine schnellere Reifeentwicklung noch verkürzt (KLOG & PLUM 2008).



Abb. 14: Aus einem Kokon schlüpfender Regenwurm - ein Regenwurmkokon gilt als das widerstandsfähigste Stadium zur Überdauerung von unwirtlichen Phasen (Foto: R. Walter)



Abb. 15: Eingekringelter Regenwurm in Diapause - endogäische Arten überdauern häufig in dieser Ruhephase ungünstige Lebensbedingungen (Foto: R. Walter)

Die im Wurzelbereich des Oberbodens lebenden Flachgräber (endogäische Arten) sind in der Lage, bei ungünstigen Bedingungen ihren Stoffwechsel zu drosseln, wozu sich die Tiere in tiefere Bodenschichten zurückziehen, einkringeln und in ein Ruhestadium begeben (Abb. 15). Obwohl tiefgrabende Arten wie *Lumbricus terrestris* Überflutungen mit fließendem sauerstoffreichen Wasser überstehen können, scheinen sie am empfindlichsten

auf Überflutungen zu reagieren (PLUM 2005, GRAEFE 1998). Ihr Vorkommen in Auen markieren deshalb meist die Bereiche mit höchstem Grundwasserflurabstand (HÖSER 2005, WILKENS 2002) und den stabilsten Bedingungen (FOURNIER et al. 2012).

Aufgrund dieser vielfältigen Anpassungsstrategien können Regenwürmer, Überflutungen überleben bzw. eingebrochene Populationen wieder aufbauen.

7.2 Gefahren von Überflutungen für Bodentiere

Nach Überflutungen können bei Regenwürmern sowohl positive wie z.B. eine Zunahme ihrer Individuendichte und Vielfalt, als auch negative Effekte wie ein Zusammenbruch von Populationen und Verschwinden von Arten auftreten (PLUM 2005). Der Grad möglicher Auswirkungen von Hochwasser auf den Regenwurmbestand wird im Wesentlichen von der Intensität der Überflutungen bestimmt, also von der Dauer und Häufigkeit einer Überflutung sowie von der Temperatur und dem Sauerstoffgehalt des Wassers (PLUM 2005, AUSDEN et al. 2001, GRAEFE 1998). In etwas tieferen Mulden, wo das Wasser nicht abfließen kann, sich erwärmt und längere Zeit stehen bleibt (Abb. 16), können somit insbesondere im Sommer stärkere Beeinträchtigungen auftreten.



Abb. 16: Senken und Mulden, in denen das Wasser länger steht und sich erwärmt, bieten für Regenwürmer und viele andere Bodenorganismen ungünstige Lebensbedingungen (Foto: Isaraue bei Landshut, Juni 2013, H. Heuwinkel)

Beginnen überflutungsintolerante Kulturpflanzen sich zu zersetzen, so dass ein schneller Abbau von Sauerstoff erfolgt, werden die Lebensbedingungen für Regenwürmer und viele andere Bodenorganismen sehr ungünstig (PLUM 2005). Kommt es dabei zu Zusammenbrüchen von Populationen, ist eine Wiederbesiedlung von umgebenden Flächen notwendig. Dies erfordert bei Bodentieren häufig einen längeren Zeitraum, abhängig von ihrer Mobilität und der Größe der betroffenen Fläche. Durchschnittlich fünf bis zehn Meter legen Regenwürmer pro Jahr zurück (EHRMANN 1996). Die Artengemeinschaft der laufstarken und z.T. auch flugfähigen Laufkäfer hatte sich nach einem verheerenden Sommerhochwasser 1997 bereits nach zwei Jahren erholt (TUF et al. 2008). Dagegen dauerte dies bei der Artengemeinschaft der weniger mobilen Asseln vier bis sechs Jahre (TUF et al. 2008).

Bei Überschwemmungen beträgt die Wasserüberstauung oft mehrere Meter. Vereinzelt wurde vermutet, dass es hierdurch zu einer hohen mechanischen Druckbelastung mit der Gefahr von Bodenverdichtungen kommen könnte. Dazu finden sich in der Literatur keine ausreichenden Belege. Aufgrund physikalischer Gesetzmäßigkeiten ist, nachdem das Wasser in die Bodenporen eingedrungen ist und dort der Wasserdruck entsprechend wirkt, eine Bodenverdichtung nicht zu erwarten.

Eine Gefahr von Bodenverdichtung besteht vielmehr durch zu frühzeitiges Befahren von nicht ausreichend nach einem Hochwasser abgetrockneten Böden (Abb. 17). Bodenverdichtungen drücken luftführende und dränfähige Bodenporen zusammen und können die Lebensbedingungen für Bodentiere verschlechtern, z.B. durch Sauerstoffmangel, Staunässe, weniger Hohlräume sowie durch Veränderungen ihrer Nahrungsmenge und -qualität. Mehrere Untersuchungen belegen, dass eine mechanische Bodenbelastung zu geringeren Siedlungsdichten bei Regenwürmern führen kann (SÖCHTIG & LARINK 1992, KRAMMER et al. 2008, WALTER et al. 2015). Dabei sind wahrscheinlich geringere Auswirkungen auf tiefgrabende Arten wie *Lumbricus terrestris* (Tauwurm) zu erwarten (WALTER et al. 2015). Ihre stabilen, vertikalen Röhren bleiben auch bei mehrfachem Überfahren wahrscheinlich noch lange erhalten. Dagegen reagieren die flach- und horizontalgrabenden, endogäischen Regenwurmart auf eine zunehmende Bodenbelastung mit abnehmender Individuendichte (WALTER et al. 2015). Das infolge mechanischer Bodenbelastung geringere Porenvolumen in der oberen Krume setzt das Dränvermögen und die Luftführung im Boden herab und führt zu veränderten Lebensbedingungen genau im oberen Bodenhorizont, wo die flachgrabenden Arten ihre höchste Aktivität haben.



Abb. 17: Fahrspuren nach zu frühzeitigem Befahren von noch nicht ausreichend abgetrockneten Böden (Fotos: R. Walter)

Um nach einer Überflutung Bodenstrukturschäden zu vermeiden und um ein vielfältiges, funktionales Bodenleben zu erhalten lohnt es sich, auf eine bodenschonende Bewirtschaftung zu achten und mehrere, teilweise sich ergänzende Maßnahmen umzusetzen z.B. kein Befahren von feuchten Böden, die Anpassung des Reifeninnendrucks (Reifenregeldruckanlage), Fahrwerke mit großer Aufstandsfläche nutzen und niedrige Radlasten bevorzugen (AID 2015, BRANDHUBER et al. 2008).

Als vorausschauende, zukunftsweisende Maßnahme gilt es zudem, die Tragfähigkeit der Böden generell zu stärken. Neben einer ausreichenden Zufuhr von organischem Material sowie einer ausreichenden Kalkversorgung der Böden sind dafür insbesondere Bodenbearbeitungsverfahren einzusetzen, die die Tragkraft des Bodens verbessern. Dies kann im Ackerbau durch eine Verringerung der Häufigkeit, Intensität und Eingriffstiefe der Bodenbearbeitung erzielt werden, z.B. durch eine Mulchsaat ohne tiefe Lockerung (BRANDHUBER et al. 2008). Denn ein durch Wurzeln und Bodentiere erzeugtes Bodengefüge ist stabiler und somit tragfähiger als eine durch Bodenbearbeitung geschaffene Gefügestruktur.

8 Dezentraler Hochwasserschutz und Förderung von Regenwürmern

8.1 Förderung des Wasserrückhalts in landwirtschaftlich genutzten Flächen – Bedeutung der Regenwürmer

Bei großen Hochwasserereignissen wie dem Junihochwasser 2013, die nach advektiven, Niederschlagsereignissen (lange Niederschlagsdauer, große Überregnungsfläche) auf wassergesättigten Böden entstehen, wird die Förderung eines natürlichen Rückhaltes in der Fläche allein als Hochwasserschutz nicht ausreichend sein (BAYERISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR UMWELT UND VERBRAUCHERSCHUTZ, Hrsg. 2014, QUAST et al. 2010). Vielmehr bedarf es hier auch eines technischen Hochwasserschutzes durch Zurückhalten, Durchleiten und Umleiten eines Teils der Wassermenge. Da aber Hochwasserereignisse in den Einzugsgebieten der Fließgewässer entstehen, muss ein integraler Hochwasserschutz auch die Verbesserung des natürlichen Wasserrückhaltes in der Fläche durch eine Förderung der Versickerungsfähigkeit von Böden beinhalten (SIEKER et al. 2008, BAYERISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR UMWELT UND VERBRAUCHERSCHUTZ, Hrsg. 2014). Zudem leisten Maßnahmen der natürlichen Wasserrückhaltung einen wichtigen Beitrag beim Schutz vor kleineren Hochwassern durch konvektive Starkniederschlagsereignisse (hohe Intensität, kleinere Überregnungsfläche, kurze Niederschlagsdauer) und zeichnen sich durch mehrere Synergieeffekte aus, wie z.B. eine Erhöhung der Grundwasserneubildung, einen Beitrag zum Erosionsschutz, eine Verringerung von Stoffausträgen aus landwirtschaftlichen Nutzflächen und eine Verbesserung des ökologischen Zustandes (RIEGER 2008, BAYERISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR UMWELT UND VERBRAUCHERSCHUTZ, Hrsg. 2014).

In ländlich geprägten Gebieten umfasst ein dezentraler Hochwasserschutz Maßnahmen an Gewässern und deren Auen (z.B. Renaturierung, Wiederherstellung natürlicher Rückhalte-räume, Anlage kleinerer Rückhaltebecken) sowie Maßnahmen in der Forst- und Landwirtschaft. Mit 70 bis 90 % trägt die landwirtschaftlich genutzte Fläche wesentlich zum Oberflächenabfluss bei (AUERSWALD 2002). Als besonders für einen verbesserten Hochwasserrückhalt geeignete Landnutzungen bzw. Bewirtschaftungsmaßnahmen gelten nach der Windach-Studie (RIEGER 2010) Aufforstungsmaßnahmen, ein ökologischer Waldumbau, eine konservierende Bodenbearbeitung, der Rückbau von Dränmaßnahmen und die Renaturierung von Moorflächen. Die größte Wirkung wurde dabei für den Waldumbau und die Aufforstungsmaßnahmen ermittelt (RIEGER 2010). Dennoch zeigt Grünland einen fast genauso niedrigen Oberflächenabfluss wie Wald (AUERSWALD 2002), so dass die Erhaltung und Ausdehnung von Grünland ebenfalls einen wichtigen Beitrag leisten kann. Zudem wird die Wasserrückhaltefähigkeit von der Bodenart bzw. den regionalen Standortbedingungen beeinflusst (DWA 2015). Beispielsweise weisen Wälder in Mittelgebirgen mit geringmächtigen Böden und geringdurchlässigem Festgestein eine schnelle unterirdische Abflussbildung auf (NIEHOFF & BRONSTERT 2002).

In einer ackerdominierten Agrarlandschaft können mulchende Bestellverfahren (Abb. 18) insbesondere bei intensiven, konvektiven Starkniederschlagsereignissen zu einer deutlichen Minderung von kleineren Hochwasserereignissen beitragen (DWA 2015, NIEHOFF & BRONSTERT 2002, QUAST et al. 2010, RIEGER 2010). Um 30 % kann eine Mulchsaat zu Reihenkulturen den Oberflächenabfluss, über eine ganze Fruchtfolge betrachtet, reduzieren (SCHRÖDER & AUERSWALD 2000). Faktoren wie ein höherer Fließwiderstand durch ei-

ne bodenbedeckende Mulchschicht, eine geringere Verschlammung und eine höhere Aggregatstabilität im Bereich der Bodenoberfläche führen bei mulchenden Bestellverfahren zu einer erhöhten Infiltration im Vergleich zu konventioneller Bodenbearbeitung mit Pflug und reinem Tisch (AUERSWALD 2002, ALHASSOUN 2009). Zudem leistet auch eine höhere Siedlungsdichte von tiefgrabenden Regenwürmern bei pflugloser Bewirtschaftung einen wichtigen Beitrag zur Minderung des Oberflächenabflusses (ALHASSOUN 2009, KRÜCK et al. 2001), da ihre vertikalen bis in den Unterboden reichenden Röhren, als dränfähige Poren dienen, die die Versickerungsleistung von Wasser in den Boden fördern. Für die tiefgrabenden Regenwürmer, insbesondere für die in Bayern am weitesten verbreitete Art *Lumbricus terrestris* (Tauwurm), ist vor allem das bei reduzierter Bodenbearbeitungsintensität und –tiefe bessere Nahrungsangebot von Streu- und Rottematerial (z.B. Zwischenfrucht- und Erntereste) an der Bodenoberfläche entscheidend (KRÜCK et al. 2001). Diese Mulchauflage wird von *Lumbricus terrestris* um seine Röhre zusammengezogen (z.B. Strohhäufchen siehe Abb. 19) sowie nach und nach in seine vertikalen Röhren in den Boden eingebracht (Abb. 20). Dadurch trägt die Art auch zum Zersetzungsprozess des organischen Materials bei. Aufgrund der Einmischungsleistung von *L. terrestris* ist auf Äckern möglichst stets auf eine ausreichende Bodenbedeckung zu achten („kein reiner Tisch“).

Desweiteren steigert der Anbau von Leguminosen in der Fruchtfolge wie z.B. Klee und Luzerne, der sich positiv auf Regenwürmer und ihre Aktivität auswirkt und die Bildung von Makroporen begünstigt, den Effekt der Wasseraufnahmefähigkeit (FISCHER et al. 2014, SCHNUG et al. 2004). Durch eine Umstellung auf ökologischen Landbau mit mehrjährigem Klee-grasanbau kann somit ebenfalls die Infiltrationsleistung verbessert werden (SCHNUG et al. 2004).



Abb. 18: Mulchsaatverfahren zu Reihenkulturen (links: abgefrorene Zwischenfrucht Ende März 2015 vor einer Zuckerrüben-Mulchsaat, rechts: Streifenbodenbearbeitung, Strip-Till-Verfahren bei Zuckerrübe Mitte Mai 2013, Fotos: R. Walter)



Abb. 19: Von Lumbricus terrestris an der Bodenoberfläche zusammengezogene Stroh-häufchen auf einem seit 20 Jahren pfluglos bearbeiteten Acker mit Winterroggen im Nov. 2014. Das Stroh der Vorfrucht Winterweizen wird von der Art nach und nach in seine vertikalen Röhren in den Boden eingebracht. (Foto: R. Walter)



Abb. 20: Leistungen der Regenwürmer am Beispiel zweier gleichermaßen mit Boden, Gülle und Stroh befüllter Terrarien, links mit und rechts ohne eingesetzte Regenwürmer jeweils 5 Monate danach. Durch die Aktivität von 10 Regenwürmern (anezische und endogäische Arten) wurde das an der Oberfläche ausgebrachte Stroh sowie die Rindergülle weitgehend in den Boden eingezogen und zahlreiche luft- und dräufähige Regenwurmröhren geschaffen. (Foto: R. Walter)

In Bayern ging der Einsatz des Pfluges zur Grundbodenbearbeitung in den letzten 30 Jahren zurück, wenn auch nicht so stark wie in anderen Bundesländern. Im Bodendauerbeobachtungsprogramm (BDF), wo seit 1985 auf ca. 90 Ackerflächen der Zustand des Bodens beobachtet wird, wurden in den 80iger Jahren 80-90 % der Äcker in Bayern jährlich gepflügt, mittlerweile liegt der Anteil bei etwa 60 bis 70 % (WALTER et al. 2015). Diese zunehmende pfluglose Bodenbearbeitung spiegelt in etwa den Trend in Bayern wieder und führte auch zu einem Anstieg der Individuendichte des tiefgrabenden Tauwurms *Lumbricus terrestris* in Äckern (WALTER & BURMEISTER 2011, WALTER et al 2015). Im Bereich des Bodenschutzes wurden also in den letzten Jahrzehnten bereits einige positive Erfolge erzielt, unter anderem als Folge einer gezielten Förderung von Mulchsaatverfahren zu Reihenkulturen für den Erosionsschutz (KISTLER et al. 2013). Dennoch lässt die Häufigkeit einer pfluglosen Bodenbearbeitung in Bayern große regionale Unterschiede erkennen. So lag 2009/2010 der Anteil nicht gepflügter Böden in Unterfranken bei über 40 %, während in Schwaben, Oberbayern, Niederbayern und in der Oberpfalz weniger als 20 % der Äcker pfluglos bewirtschaftet wurden (Abb. 21). Damit besteht vor allem in Südbayern durch eine weitere Verbreitung mulchender Bestellverfahren noch eine gute Möglichkeit, das Wasserrückhaltepotential bei konvektiven Starkniederschlagsereignissen weiter auszuschöpfen und so zur Minderung von kleineren Hochwasserereignissen sowie insbesondere auch zum Erosionsschutz beizutragen.

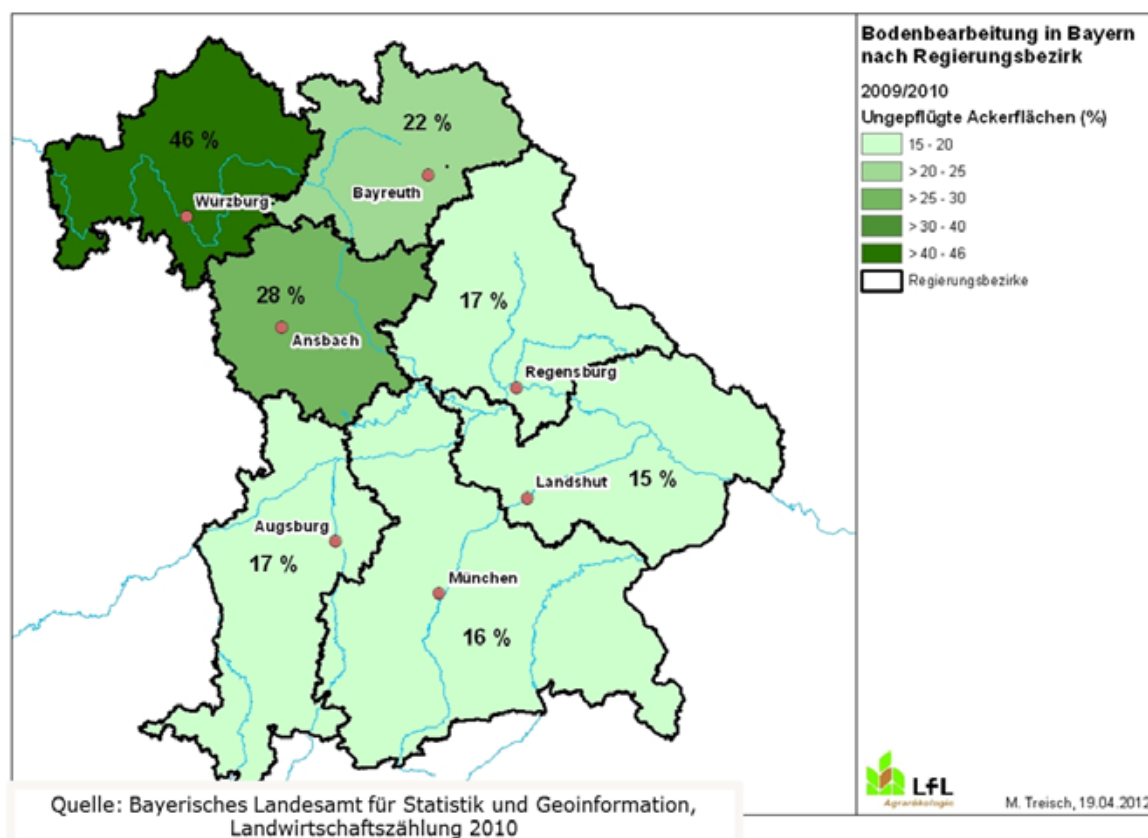


Abb. 21: Anteil ungepflügter Ackerflächen für die Regierungsbezirke in Bayern (M. Treisch)

Ziel sollte es sein, mulchende Bestellverfahren noch stärker in die Praxis zu integrieren und insbesondere bei der Ausführung der Mulchsaat auf eine gute Entwicklung des Zwi-

schenfruchtbestandes zu achten sowie die Bodenbearbeitung zur Saatbettbereitung so zu gestalten, dass ein ausreichend hoher Anteil an Mulchmaterial an der Bodenoberfläche belassen wird. Eine Fachplanung zur Identifizierung von Schwerpunktgebieten, die aufgrund ihrer Standortbedingungen für eine pfluglose Bodenbearbeitung geeignet sind und die auch aufgrund eines hohen Wasserrückhaltepotentials positive Effekte für einen vorbeugenden Hochwasserschutz erwarten lassen, kann hierbei zielführend sein (DWA 2015). Ergänzend kann in ackerdominierten Agrarlandschaften insbesondere in erosionsgefährdeten Gebieten eine Feldunterteilung sowie die Anlage von Rand- und Saumstrukturen eine wesentliche wasserrückhaltende Wirkung haben. Vor allem in reliefbedingten Abflussbahnen trägt eine permanente Begrünung deutlich zur Minderung des Oberflächenabflusses bei (VOß et al. 2010, DWA 2015).

Durch eine bodenschonende Bewirtschaftung mit mulchenden Bestellverfahren sowie durch eine reichgegliederte Agrarlandschaft mit Saum- und Randstrukturen wird auch ein reichhaltiger Regenwurmbestand gefördert, der wahrscheinlich gute Voraussetzungen bietet, dass eine größere Anzahl Regenwürmer Hochwasserereignisse überstehen bzw. sich Populationen rascher wieder regenerieren können.

8.2 Empfehlungen zur Förderung von Regenwürmern

Neben den natürlichen Standort- und Witterungsbedingungen wird der Regenwurmbestand von Äckern vor allem von der Bewirtschaftungsweise stark beeinflusst. So gibt es im Ackerbau zahlreiche Möglichkeiten den Regenwurmbestand gezielt zu erhöhen, z.B. durch eine ausreichende Zufuhr von organischem Material, durch eine Reduzierung der Bodenbearbeitung, durch den Anbau von Zwischenfrüchten oder durch eine reichhaltige Fruchtfolge mit Klee- und Luzerne-Gras-Gemenge (Tab. 9). Insgesamt wirken vielfältige Einflussfaktoren auf das Bodenleben, so dass es wichtig ist, das gesamte Bewirtschaftungssystem zu betrachten und aufeinander abzustimmen.

Grünlandflächen weisen durchschnittlich einen deutlich höheren Regenwurmbestand mit höherer Artenvielfalt als Äcker auf (EHRMANN 2012a, RÖMBKE et al. 2012, WALTER et al. 2015), so dass Regenwürmer besonders durch die Erhaltung und Neueinsaat von Grünlandflächen profitieren. Dies trifft v.a. für die streubewohnenden und tiefgrabenden Regenwurmarten der Gattung *Lumbricus* zu. So ist in Bayern im Grünland die Individuendichte der Regenwürmer im Mittel doppelt so hoch und ihre Biomasse ca. dreimal höher als im Acker (WALTER et al. 2015). Nur wenige Äcker erreichen beispielsweise bei einer reichhaltigen Fruchtfolge mit viel Klee gras oder langjähriger pflugloser Bewirtschaftung einen ähnlich hohen Regenwurmbestand wie Grünland. Günstig für die Regenwürmer, insbesondere in ackerdominierten Landschaften, ist auch die Anlage von Begleitstrukturen wie Randstreifen und Blühflächen. So war auf Blühflächen, ca. zwei Jahre nach ihrer Einsaat, im Mittel eine dreifach höhere Siedlungsdichte und Biomasse der Regenwürmer als in den Vergleichsäckern nachzuweisen (WALTER 2014).

Da Regenwürmer wichtige Funktionen des Bodens, wie eine intakte Bodenstruktur und die Wasserversickerung unterstützen, kann durch ihre gezielte Förderung in landwirtschaftlich genutzten Böden ein wichtiger Beitrag für den dezentralen Hochwasserschutz geleistet werden. Um nach einer Überflutung überschwemmte Böden wieder stärker zu beleben und in Krümelstruktur zu bringen ist insbesondere auf eine bodenschonende Bewirtschaftung (kein Befahren zu feuchter Böden) zu achten sowie ein verbessertes Nahrungsangebot für das Bodenleben zu fördern, z.B. durch eine organische Düngung und den An-

bau von Zwischenfrüchten (Tab. 9). Ein Nachkalken in angemessenen Aufwandsmengen kann ebenfalls empfohlen werden.

Tab. 9: Maßnahmen zur Förderung des Regenwurmbestandes auf landwirtschaftlichen Nutzflächen

Beispiele	
Reichhaltige Fruchtfolgen	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Mindestens dreigliedrig ➤ Wenig humuszehrende Früchte (Hackfrüchte) ➤ Anbau von Klee- oder Luzerne-Gras-Gemenge (ein-, mehr-jährig)
Organische Düngung	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Gülle, Stallmist, Biogasgärreste, Kompost ➤ Zwischenfrüchte, Gründüngung, Mulchen ➤ Verbleib von Ernterückständen (Stroh)
Bodenschonende Bewirtschaftung	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Reduzierung der Bodenbearbeitung (v.a. die Häufigkeit und Intensität, Pflugverzicht) ➤ Mulch- und Direktsaat statt reiner Tisch ➤ Bodenverdichtungen vermeiden ➤ Unbedeckte Winterfurche vermeiden ➤ Kalken in angemessenen Aufwandsmengen
Kleinräumige Nutzungsvielfalt und Begleitstrukturen in der Agrarlandschaft	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Kleinräumige Nutzungsvielfalt ➤ unbewirtschaftete Areale, z.B. Randstreifen, Raine, Hecken, Blühstreifen
Agrarumweltmaßnahmen	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Ökologischer Landbau ➤ Gewässer- und Erosionsschutzstreifen, Blühflächen
Grünlanderhalt	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Vermeiden von Grünlandumbruch ➤ Neueinsaat von Grünland

9 Fazit

Insgesamt wiesen die meisten der überfluteten Ackerflächen bereits vier Monate nach der bis zu einer Woche dauernden Überflutung keinen geringeren Regenwurmbestand und keine geringere Artenvielfalt im Vergleich zu nicht überfluteten Kontrolläckern auf. Die Untersuchungen in Niederalteich bei Deggendorf bestätigen, dass Regenwürmer Überflutungen im Sommer zumindest bis zu einer Woche gut überstehen können. Vor allem die streubewohnenden (epigäischen) und flachgrabenden mineralischichtbewohnenden (endogäischen) Arten haben hierfür gute Anpassungsstrategien entwickelt. Auch die am empfindlichsten auf eine Überflutung reagierenden tiefgrabenden Arten (PLUM 2005, FOURNIER et al. 2012) können Hochwasserereignisse, die in einem größeren zeitlichen Abstand erfolgen, überdauern wie die Erhebungen in der Flutmulde Landshut zeigen. Dennoch kann Hochwasser zu Verlusten bei Regenwürmern führen, wie Beobachtungen von toten Regenwürmern nach einer Überflutung bestätigen (Abb. 2). Wahrscheinlich betrafen diese aber nur einen kleinen Teil ihrer Populationen. Werden beispielsweise nach einer Überflutung im Mittel ca. 10 Regenwürmer pro Quadratmeter tot an der Ackeroberfläche gesichtet, sind dies ca. 10 % des Regenwurmbestandes bezogen auf eine durchschnittliche Siedlungsdichte von ca. 100 bis 120 Individuen/m² in bayerischen Äckern (WALTER & BURMEISTER 2013). Große Bestandsverluste und Populationsschwankungen der Regenwürmer können auch durch sehr langanhaltende trockene Sommer (EHRMANN 2012b) oder lange kalte Winter (TIMMERMANN et al. 2006) entstehen. Eine Sommertrockenheit kann sich sogar ungünstiger auf den Regenwurmbestand auswirken als ein Sommerhochwasser (PLUM & FILSER 2005). Durch die im Raum Deggendorf nach dem Juni-Hochwasser 2013 auftretende langanhaltende Sommertrockenheit waren mögliche kurzfristige Auswirkungen der Überflutung auf Regenwürmer im Oktober 2013 nicht mehr nachweisbar bzw. quantifizierbar. Witterungseinflüsse aber auch Standortbedingungen, die beispielsweise zu einer schnelleren Austrocknung des Bodens führen können somit wesentlich den Regenwurmbestand prägen.

Bleibende Auswirkungen der Verunreinigung durch Heizöl auf die Individuendichte, Biomasse und Artenvielfalt der Regenwürmer konnten nicht nachgewiesen werden. Entscheidend hierfür war wahrscheinlich, dass die MKW-Verunreinigung sich auf die oberen 2 cm des Bodens beschränkte, also keine Verlagerung in tiefere Bodenschichten erfolgte und sich der hohe Mineralölkohlenwasserstoffgehalt von 5800 mg/kg Boden Mitte Juli 2013 in einem kurzen Zeitraum bis Anfang November 2013 aufgrund einer hohen mikrobiologischen Aktivität nach einer oberflächennahen Vertikutierung schnell auf 83 mg/kg Boden abbaute. Bei MKW-Werten unter 100 mg/kg Boden (= Z0-Wert nach LAGA-Merkblatt) ist davon auszugehen, dass relevante Schutzgüter nicht beeinträchtigt werden. Günstig für Regenwürmer war zudem der Zeitraum der MKW-Belastung im Sommer während ihrer Ruhephase, wenn sich diese in tiefere Bodenschichten zurückziehen. Zu beachten ist dennoch, dass bereits bei deutlich geringeren MKW-Werten, als hier im Untersuchungsgebiet nachgewiesen, toxische Effekte auf Regenwürmer in Laborversuchen festgestellt wurden (SCHAEFER 2003).

Durch die Anlage von Hochwasserpoldern, die nur bei größeren Hochwasserereignissen (fünfzig bis hundertjährigen Ereignissen, HQ 100) für mehrere Tage geflutet werden, ist auf Basis der in der Flutmulde Landshut gewonnen Erkenntnisse bei Grünland keine größere Beeinträchtigung der Regenwurmsiedlungsdichte und ihrer Artenvielfalt zu erwarten, sofern keine Sedimenteinträge in größerem Umfang erfolgen. Dennoch gilt es zu berücksichtigen, dass es sich bei der Flutmulde in Landshut um fließendes Wasser handelte und

dass nach Überflutungen bei Regenwürmern sowohl positive, wie z.B. eine Zunahme der Individuendichte und Vielfalt, als auch negative Effekte wie ein Zusammenbruch von Populationen und Verschwinden von Arten auftreten können (PLUM 2005). Der Grad möglicher Auswirkung von Hochwasser auf den Regenwurmbestand wird im Wesentlichen von der Intensität der Überflutung bestimmt, also von deren Dauer und Häufigkeit sowie von der Wassertemperatur und dem Sauerstoffgehalt (PLUM 2005, AUSDEN et al. 2001, GRAEFE 1998). Ungünstig sind beispielsweise Mulden, in denen das Wasser länger stehen bleibt und sich erwärmt.

Treten Bestandseinbrüche von Regenwürmern nach einem Hochwasserereignis auf, gibt es vor allem im Ackerbau mehrere Möglichkeiten ihre Bestandsdichte wieder gezielt zu fördern. Wichtig ist dabei das Nahrungsangebot für das Bodenleben zu verbessern, z.B. durch eine ausreichende Zufuhr von organischem Material oder durch den Anbau von Zwischenfrüchten und Klee- und Luzerne-Gras-Gemenge. Um nach einer Überflutung Bodenstrukturschäden zu vermeiden und zur Förderung eines vielfältigen, funktionalen Bodenlebens lohnt es sich, auf eine bodenschonende Bewirtschaftung zu achten und ein Befahren von feuchten Böden zu vermeiden.

Im Rahmen des dezentralen Hochwasserschutzes sollten auf Ackerflächen mulchende Bodenbearbeitungs- und Bestellverfahren noch stärker in die Praxis integriert werden. Dadurch wird die Infiltration erhöht und der Oberflächenabfluss und die Erosion gemindert (AUERSWALD 2002, ALHASSOUN 2009). Auch auf tiefgrabende Regenwürmer wie den Tauwurm (*Lumbricus terrestris*) wirkt sich eine Reduktion der Häufigkeit, Intensität und Eingriffstiefe der Bodenbearbeitung günstig aus, wie die Zunahmen seiner Siedlungsdichte in den Boden-Dauerbeobachtungsflächen bestätigen. Die vertikalen Röhren dieser Art fördern wiederum die Versickerung von Niederschlägen in den Boden. Insbesondere in Südbayern, wo weniger als 20 % der Äcker pfluglos bewirtschaftet werden, besteht in ackerdominierten Agrarlandschaften ein gutes Potential durch mulchende Bodenbearbeitungs- und Bestellverfahren das Wasserrückhaltepotential bei konvektiven Starkniederschlagsereignissen weiter auszuschöpfen und zur Minderung von Erosion und kleineren Hochwasserereignissen beizutragen. Ein durch eine bodenschonende Bewirtschaftung geförderter reichhaltiger Regenwurmbestand bietet auch gute Voraussetzungen, dass eine größere Anzahl Regenwürmer Hochwasserereignisse übersteht bzw. sich rascher wieder regenerieren kann.

Literaturverzeichnis

- AID INFODIENST (Hrsg.) (2015): Gute fachliche Praxis – Bodenbewirtschaftung und Bodenschutz. - Heft, 118 S.
- ALHASSOUN, R. (2009): Studies on factors affecting the infiltration capacity of agricultural soils. - Schriftenreihe Dissertation aus dem Julius Kühn-Institut. <http://www.jki.bund.de>
- AUERSWALD, K. (2002): Landnutzung und Hochwasser. - Rundgespräche der Kommission für Ökologie, Bd. 24 „Katastrophe oder Chance? Hochwasser und Ökologie“ - S. 67-76, Verlag Dr. Friedrich Pfeil, München.
- AUSDEN, M., SUTHERLAND, W.J., JAMES, R. (2001): The effects of flooding lowland wet grassland on soil macroinvertebrate prey of breeding wading birds. - Journal of Applied Ecology 38, 320-338.
- BAUER, H.-G., BEZZEL, E., FIEDLER, W. (2005): Das Kompendium der Vögel Mitteleuropas. - Aula-Verlag, Wiebelsheim, 622 S.
- BAYERISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR UMWELT UND VERBRAUCHERSCHUTZ (2014 Hrsg.): Hochwasserschutz Aktionsprogramm 2020plus. Bayerns
gie https://www.regierung.unterfranken.bayern.de/assets/6/3/hochwasserschutz_aktionsprogramm_2020_plus.pdf
- 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, 161-182.
- BIERI, M., CUENDET, G. (1989): Die Regenwürmer, eine wichtige Komponente von Ökosystemen. Schweiz. - Landwirtschaftliche Forschung, Recherche agronomique en Suisse 28(2), 81-96.
- BRANDHUBER, R., DEMMEL, M., KOCH, H.-J., BRUNOTTE, J. (2008): Bodenschonender Einsatz von Landmaschinen, Empfehlungen für die Praxis. - DLG Merkblatt 344.
- DUNGER, W. (2008): Tiere im Boden. - Westarp Wissenschaften, Hohenwarsleben, 280 S.
- DWA (Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall, Arbeitsgruppe HW 4.3 Dezentraler Hochwasserschutz, Hrsg. 2015): DWA-Regelwerk, Merkblatt DWA-M 550, Dezentrale Maßnahmen zur Hochwasserminderung.
- CHAINEAU, C.H., YEPPEMIAN, C., VIDALIE, J.F., DUCREUX, J., BALLERINI, D. (2003): Bioremediation of a crude oil polluted soil: Biodegradation, leaching and toxicity assessments. – Water, Air and Soil Pollution 144, 419-440.
- EHRMANN, O., BABEL, U. (1991): Quantitative Regenwurmerfassung – ein Methodenvergleich. - Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft 66(I), 475-478.
- EHRMANN, O. (1996): Regenwürmer in einigen südwestdeutschen Agrarlandschaften: Vorkommen, Entwicklung bei Nutzungsänderungen und Auswirkungen auf das Bodengefüge. - Hohenheimer Bodenkundliche Hefte, Heft 35, 135 S.
- EHRMANN, O. (2012a): Der unterirdische Mitarbeiterstamm. Bedeutung von Regenwürmern für den Ackerbau. – Landwirtschaft ohne Pflug 11, 25-34.

- EHRMANN, O. (2012b): Auswirkungen des Klimawandels auf die Regenwürmer Baden-Württembergs. - Hrsg. LUBW. 64 S. (aufgerufen am 26.01.2015). <http://www.fachdokumente.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/101762/U13-M315-N08.pdf?command=downloadContent&filename=U13-M315-N08.pdf>
- FISCHER, C. ROSCHER, C., JENSEN, B., EISENHAEUER, N., BAADE, J., ATTINGER, S., SCHEU, S., WEISSER, W., SCHUMACHER, J., HILDEBRANDT, A. (2014): How do earthworms, soil texture and plant composition affect infiltration along an experimental plant diversity gradient in grassland? - PLOS One Vol. 9, 1-12.
- FOURNIER, B., SAMARITANI, E., SHRESTHA, J., MITCHELL, E.A.D., LE BAYON, R.-C. (2012): Patterns of earthworm communities and species traits in relation to perturbation gradient of a restored floodplain. - Applied Soil Ecology 59, 87-95.
- FRÜND, H.-C., JORDAN, B. (2003): Regenwurmerfassung mit Senf oder Formalin? Versuche zur Eignung verschiedener Senfzubereitungen für die Austreibung von Regenwürmern. - Osnabrücker Naturwissenschaftliche Mitteilungen 29, 97-102.
- GRAEFE, U. (1998): Annelidenzönosen nasser Böden und ihre Einordnung in Zersetzergesellschaften. - Mitteilungen der Deutschen bodenkundlichen Gesellschaft 88, 109-112.
- GRAFF, O. (1983): Unsere Regenwürmer – Lexikon für Freunde der Bodenbiologie. - Verlag M. & H. Schaper, Hannover, 112 S.
- HÖSER, N. (2003): Die Verteilung der Regenwürmer in der Aue des Mieresch (Siebenbürgen, Banat, Rumänien). - Verh. Zool. Bot. Ges. Österreich 140, 99-114.
- HÖSER, N. (2005): Regenwürmer im geomorphologischen Relief der Aue des Mittelbegebietes. - Veröffentlichungen der LPR Dr. Reichhoff, Heft 3, 71-76.
- HÖSER, N. (2008): Die Regenwürmer *Proctodrilus tuberculatus* (CERNOSVITOV, 1935) und *Proctodrilus antipai* (MICHAELSEN, 1891) als Indikatoren der fossilen Oberflächengliederung der Flussau (Oligochaeta: Lumbricidae). - Hercynia N. F.41, 263-272.
- KEPLIN, B., HOFFMANN, U., BROLL, G. (1995): Extensivierung einer Pufferzone zum Schutz eines Hochmoorrestes – Auswirkungen der Wiedervernässung auf die Lumbricidenfauna. - Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft, 76, 819-822.
- KISTLER, M., BRANDHUBER, R. MAIER, H. (2013): Wirksamkeit von Erosionsschutzmaßnahmen. Ergebnisse einer Feldstudie. - Schriftenreihe LfL 8/2013.
- KLOK, C., PLUM, N. (2008): Does *Lumbricus rubellus* (Lumbricidae) adapt to flooding in wetlands by early maturation? Support from field data. - PECKIANA Volume 5, 41-51.
- KRAMER, S., WEISSKOPF, P., OBERHOLZER, H.-R. (2008): Status of Earthworm populations after different compaction impacts and varying subsequent soil management practices. - 5th International Soil conference ISTRO Czech Branch, 249-256.
- KRÜCK, S., NITZSCHE, O., SCHMIDT, W. (2001): Regenwürmer vermindern Erosionsgefahr. - Landwirtschaft ohne Pflug 1, 18-21.
- LÄNDERARBEITSGEMEINSCHAFT ABFALL (LAGA): Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Reststoffen/Abfällen – Technische Regeln (LAGA-

- Merkblatt 20) vom
6.11.1997 http://www.izu.bayern.de/praxis/download/m20_1997.pdf
- LEHMITZ, R. RÖMBKE, J., GRAEFE, U., BEYLICH, A. KRÜCK, S. (2016): Rote Liste und Gesamtartenliste der Regenwürmer (Lumbricidae et Criodrilidae) Deutschlands. - Naturschutz und Biologische Vielfalt 70 (4), 565-590, Hrsg. Bundesamt für Naturschutz Bad Godesberg.
- LUKASIEWICZ, J. (1996): Predation by the beetle *Carabus granulatus* (Coleoptera, Carabidae) on soil macrofauna in grassland on drained plots. - *Pedobiologia* 40, 364-376.
- NIEHOFF, D., BRONSTERT, A. (2002): Landnutzung und Hochwasserentstehung: Modellierung anhand dreier mesoskaliger Einzugsgebiete. – *Wasser & Boden*, 54/10, 20-28.
- ÖSTREICHER, S., TREFFLER, J. (2015): Hochwasserschutz im ländlichen Raum. - *Schule und Beratung* 5, 18-20.
- PELOSI, C., BERTRAND, M., CAPOWIEZ, Y., BOIZARD, H., ROGER-ESTRADE, J. (2009): Earthworm collection from agricultural fields: Comparisons of selected expe-lants in presence/absence of hand-sorting. - *European Journal of Soil Biology* 45, 176-183.
- PLUM, N (2005): Terrestrial invertebrates in flooded grassland: A literature review. - *Wetlands Vol* 25, 721-737.
- PLUM, N. M., FILSER J. (2005): Floods and drought: Response of earthworms and pot-worms (Oligochaeta: Lumbricidae, Enchytraeidae) to hydrological extremes in wet grasslands. - *Pedobiologia* 49, 443-45.
- QUAST, et al. (2010): BMBF-Verbundprojekt MinHorLam – Minderung von Hochwasser- risiken durch nicht strukturelle Landnutzungsmaßnahmen in Abflussbildungs- und Überschwemmungsgebieten – eine transdisziplinäre Studie zur Effektivität solcher Maßnahmen. Ergebnisbericht, Abschlussdokumentation. Online verfü- bar: <https://project2.zalf.de/minhorlam/ergebnisbericht/ergebnisbericht>>
- RIEGER, W. (2008): Entwicklung einer Methodik zur Erstellung von Hochwasserrückhal- tekzepten unter Berücksichtigung des Klimawandels am Beispiel der Win- dach. - 1. Bericht: Literatur zum dezentralen Hochwasserschutz, 199S.
- RIEGER, W. (2010): Entwicklung einer Methodik zur Erstellung von Hochwasserrückhal- tekzepten unter Berücksichtigung des Klimawandels am Beispiel der Win- dach. - 3. Bericht: Maßnahmenkonzepte, Klimaszenarien und Zusammenfassung. 111S.
- RÖMBKE, J., ROß-NICKOLL, M., TOSCHKI, A., HÖFER, H., HORAK, F., RUSSEL, D., BURKHARDT, U., SCHMITT, H. (2012): Erfassung und Analyse des Bodenzustands im Hinblick auf die Umsetzung und Weiterentwicklung der Nationalen Biodiver- sitätsstrategie. - UBA TEXTE 33/2012. .
- SCHAEFER, M. (2003): Behavioural Endpoints in Earthworm Ecotoxicology. - *J. Soils & Sediments* 3 (2), 79-84.
- SCHAEFER, M., PETERSEN, S.O., FILSER, J. (2005): Effects of *Lumbricus terrestris*, *Allolo- bophora chlorotica* and *Eisenia fetida* on microbial community dynamics in oil- contaminated soil. - *Soil Biology & Biochemistry* 37, 2065-2076.

- SCHILLING, B. (2014): Bodenbelastung nach dem Juni-Hochwasser 2013. - Merkblatt Bayerisches Landesamt für Umwelt. http://www.lfu.bayern.de/boden/klimawandel_und_boden/doc/bodenbelastungen_junihw_2013.pdf
- SCHNUG, E., ROGASIK, J., PANTEN, K., PAULSEN, H.M., HANEKLAUS, S. (2004): Ökologischer Landbau erhöht die Versickerungsleistung von Böden. - *Ökologie & Landbau* 132,4: 53-55.
- SCHRÖDER, R. AUERSWALD, K. (2000): Modellierung des Jahresganges der verschlammungsinduzierten Abflussbildung in kleinen landwirtschaftlich genutzten Einzugsgebieten. - *Z. Kulturtechnik Landentwicklung* 41: 167-172.
- SIEKER, F., ZACHARIAS, S., WILCKE, D., SCHMIDT, W.-A., SIEKER, H., MERTA, M. (2008): Vorbeugender Hochwasserschutz durch Wasserrückhalt in der Fläche – Untersuchung am Beispiel des Einzugsgebietes der Mulde in Sachsen. - *GWF Wasser Abwasser* 149 (Nr. 5), 2-13.
- SÖCHTIG, W. LARINK, O. (1992): Effect of soil compaction on activity and biomass of endogeic lumbricids in arable soils. - *Soil Biology and Biochemistry* 24 (12), 1595-1599.
- SUTTNER, T., MARTIN, W., SCHMEDERER, J., POMMER, G. (2002): Ergebnisse eines Boden-Monitoring-Programms anlässlich des Pfingsthochwassers 1999 in Bayern. - *Wasser & Boden*, 54/1+2, 65-70.
- TIMMERMAN, A. BOS, D., OUWEHAND, J., DEGOEDE, R.G.M. (2006): Long term effects of fertilisation regime on earthworm abundance in a semi-natural grassland area. - *Pedobiologia* 50, 427-432.
- TUF, I.H., DEDEK, P., JANDOVA, S. TVARDIK, D. (2008): Length of recovery of soil macrofauna communities (Coleoptera: Carabidae, Isopoda: Oniscidea) after an irregular summer flood. - *Peckiana* Volume 5, 65-75.
- VOLZ, P. (1976): Regenwurm-Populationen im Naturschutzgebiet „Hördter Rheinaue“ und ihre Abhängigkeit vom Feuchtigkeitsregime des Standorts. - *Mitt. Pollichia* 64, 110-120.
- VOSS, J., SCHWAN, A., HEYNE, W., MÜLLER, N. (2010): Erosionsschutz in reliefbedingten Abflussbahnen – Entwicklung von Umsetzungsstrategien und-planungen für eine natur- und bodenschutzgerechte dauerhafte Begrünung von besonders erosionswirksamen Abflussbahnen. Schriftenreihe des Sächsischen Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Heft 13/2010. Online unter <https://publikationen.sachsen.de/bdb/artikel/11386>
- WALTER, R. & J. BURMEISTER (2011): 25 Jahre Regenwurmerfassung auf landwirtschaftlich genutzten Boden-Dauerbeobachtungsflächen in Bayern. In: Bayerisches Landesamt für Umwelt (Hrsg.): Den Boden fest im Blick - 25 Jahre Bodendauerbeobachtung in Bayern, 10-22.
- WALTER, R. (2014): Evaluierung des Regenwurmbestands zweijähriger Blühflächen. In: Wagner, C., Bachl-Staudinger, M., Baumholzer, S., Burmeister, J., Fischer, C., Karl, N., Köppl, A., Volz, H., Walter, R., Wieland, P. (Hrsg.): Faunistische Evaluierung von Blühflächen, Schriftenreihe der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft 1/2014, 33-43.

-
- WALTER, R., BURMEISTER, J. (2013): Regenwürmer in bayerischen Ackerböden. - Merkblatt der bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft.
- WALTER, R., BURMEISTER, J., BRANDHUBER, R. (2015): Regenwürmer – aktuelle Gefahren und positive Entwicklungen in landwirtschaftlich genutzten Böden. - In: Tagungsband „Jahr des Bodens“, Schwere Maschinen, enge Fruchtfolgen, Gärreste – eine Gefahr für die Bodenfruchtbarkeit? Fachtagung, 13. Kulturlandschaftstag 18. und 19. Juni 2015, Würzburg, Hrsg. BMEL, LfL Bayern, 26-39.
- WILKENS, H. (2002): Möglichkeiten und Grenzen der Auenregeneration und Auenwaldentwicklung am Beispiel von Naturschutzprojekten an der Unteren Mittelbe (Brandenburg). Teilprojekt 5: Zoologie Folgenabschätzung von Auenwaldbe-gründung und Deichrückverlegung auf Biozöosen der Lenzer Elbtalaue mit Hilfe faunistischer Indikatoren. - Endbericht Teil IV:
se http://elise.bafg.de/servlet/is/3819/Endb_LAGS_Zoologie_Bodenbiozoenose.pdf
- ZORN, M.I., CORNELIS, VAN GESTEL, C.A.M., EIJSACKERS, H. (2005): Species-specific earthworm population responses in relation to flooding dynamics in a Dutch floodplain soil. - *Pedobiologia* 49, 189-198.

Dank

Die Autoren bedanken sich bei der Benediktinerabtei Niederaltaich, bei Herrn Berger sowie beim Wasserwirtschaftsamt Landshut für die Bereitstellung der Untersuchungsflächen. Zudem gilt unser Dank allen Mitarbeiter und Mitarbeiterinnen der Arbeitsgruppe Bodentiere für ihren tatkräftigen und engagierten Einsatz bei der Regenwurmprobenahme und Bestimmung der Regenwurmart in Labor.

Für die Analysen der Mineralölkohlenwasserstoffgehalte bedanken wir uns bei Dr. Eiberweiser Geoconsult GmbH und für die uns zur Verfügung gestellten Fotos bei Herrn Bauer von agroluftbild, bei Frau Högenauer (Fachzentrum für Agrarökologie, AELF Krumbach) sowie bei Herrn Heuwinkel (Hochschule Weihenstephan-Triesdorf). Die Übersetzung der deutschen Zusammenfassung ins Englische übernahm Frau Katrin Dalitz, auch Ihr gilt unser Dank.