



Landesanstalt für Umweltschutz
Baden-Württemberg



Ökologische
Umweltbeobachtung 5

Schwermetalle in Regenwürmern Baden-Württembergs

 Ergebnisbericht



Baden-Württemberg



Landesanstalt für Umweltschutz
Baden-Württemberg

Schwermetalle in Regenwürmern Baden-Württembergs

 Ergebnisbericht

HERAUSGEBER	Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg 76157 Karlsruhe, Postfach 21 07 52 www.lfu.baden-wuerttemberg.de
BEARBEITUNG	Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg Kay Rahtkens und Dr. Theo v. d. Trenck
REDAKTION	Landesanstalt für Umweltschutz-Baden-Württemberg Referat 23 - Biologische Umweltbeobachtung
BEZUG	Download unter www.lfu.baden-wuerttemberg.de
ISSN	0949 - 0477
ISBN	3-88251-298-9
STAND	Dezember 2005, 1. Auflage

Nachdruck - auch auszugsweise - nur mit Zustimmung des Herausgebers unter Quellenangabe und Überlassung von Belegexemplaren gestattet

ZUSAMMENFASSUNG	6
1 EINLEITUNG UND ZIEL DER UNTERSUCHUNG	7
2 MATERIAL UND METHODEN	8
3 ENTWICKLUNG DER SCHADSTOFFGEHALTE IN REGENWÜRMERN	11
4 ÖKOTOXIKOLOGISCHE BEWERTUNG	15
5 DARSTELLUNG DER RISIKO-KENNLINIEN	19
6 LITERATURVERZEICHNIS	22

Zusammenfassung

Seit 1984 untersucht die Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg auf den Wald-Dauerbeobachtungsflächen des Ökologischen Wirkungskatasters die Schwermetallbelastung von Regenwürmern. Das Ziel dieser Untersuchungen ist es, mit Hilfe des Bioindikators „Regenwurm“ Schadstoffwirkungen auf den Lebensraum Boden mit seiner Biozönose (Bodenlebewelt) zu ermitteln. Aufgrund ihrer Lebensweise und Akkumulationsfähigkeit für Schwermetalle, ihrer weiten Verbreitung und Häufigkeit in Böden, ihrer relativen Ortstreue und nicht zuletzt wegen ihrer Relevanz für ökosystemare Prozesse eignen sich Regenwürmer grundsätzlich gut als Bioindikatoren. Darüber hinaus ist eine ökotoxikologische Beurteilung der Wald-Dauerbeobachtungsflächen von besonderem Interesse, da bislang nur wenig Informationen über die toxikologische Einschätzung der Metallgehalte und die mögliche Übertragbarkeit (Indikationswert) auf andere Ökosystemkomponenten vorliegen.

Zu Beginn der Untersuchungen wurden nur Blei und Cadmium gemessen; im Laufe der Jahre kamen bei den Wiederholungsmessungen weitere Metalle und Metalloide wie Aluminium, Arsen, Chrom, Kupfer, Mangan, Nickel, Quecksilber, Thallium, Vanadium und Zink hinzu. Für die Schwermetalle Blei und Cadmium liegen Zeitreihenuntersuchungen seit 1985/86 vor. Die Untersuchungen zeigen eine kontinuierliche Abnahme der Schadstoffgehalte im Landesdurchschnitt und eine überdurchschnittlich hohe Abnahme in den ehemals stark belasteten Regenwurmhabitaten des Odenwaldes und des Schwarzwaldes. Mit wenigen Ausnahmen liegen diese Schadstoffgehalte in den Regenwürmern heute auf einem niedrigen Niveau.

Da der Boden eine wichtige Funktion als Lebensraum für Bodenorganismen besitzt wurden auch Schwellenwerte für toxische Reaktionen am Beispiel des Regenwurms untersucht. Hierfür wurden so genannte Risiko-Kennlinien erarbeitet.

Bei der Bewertung der Wirkung eines Stoffes ist seine Mobilität, die einen sehr großen Einfluss auf seine Bioverfügbarkeit und Toxizität hat, zu berücksichtigen. Die Mobilität der Metalle wurde als Verhältnis des mobilen Gehaltes zum Gesamtgehalt definiert.

Die ökotoxikologische Bewertung anhand der Kennlinien zeigte, dass die Schwermetallbelastung der untersuchten Wald-Dauerbeobachtungsflächen im Hintergrund- bzw. Vorsorgebereich liegt und den ermittelten, auf der Empfindlichkeit von Regenwürmern basierenden Prüfwert deutlich unterschreitet. Dies bedeutet, dass die Wald-Dauerbeobachtungsflächen des Ökologischen Wirkungskatasters keine bis geringe Belastungen mit den Metallen Cadmium, Kupfer, Blei, Nickel und Zink aufweisen.

Wegen des stetigen, geringen Eintrages von Schwermetallen durch die atmosphärische Deposition ist die Fortführung der Dauerbeobachtung in reduziertem Umfang aber weiterhin notwendig, um ggfs. erneut Minderungsmaßnahmen empfehlen zu können.

Um zu prüfen, inwieweit Regenwürmer Schwermetalle akkumulieren, wurden weitere Untersuchungen an Standorten mit nur einer Schwermetallkontamination (Monobelastung mit Chrom, Kupfer oder Cadmium) ausgewählt. Die Beobachtungen zeigen, dass die Regenwürmer Schwermetalle erst ab einer bestimmten Konzentration im Boden akkumulieren, dann aber zunehmend und je nach Metall unterschiedlich stark.

Da sich diese Aussage bislang nur auf wenige Daten stützt, sollte sie durch weitere Untersuchungen abgesichert werden, um letztlich Schwellenwerte für die Akkumulationsfähigkeit festlegen zu können.

1 Einleitung und Ziel der Untersuchung

Böden sind Lebensraum für eine Vielzahl sehr unterschiedlicher Lebewesen. Diese Bodenlebewesen umfassen die Klasse der Bakterien und Pilze, aber auch kleinere und mittlere Tiere (Meso- und Makrofauna), wie Fadenwürmer, Asseln, Milben, Springschwänze, Hundert- und Tausendfüßer, Spinnen und Regenwürmer. Darüber hinaus gibt es zahlreiche Wirbeltiere, die zumindest zeitweilig im Boden leben, wie Mäuse, Maulwurf oder Ziesel.

Unter den Bodentieren, die ständig im Boden einschließlich der Laubstreu von Wäldern leben, zählen die Regenwürmer (Lumbriciden) zu den größeren bis größten Tieren. Die mindestens 35 Regenwurmart, die für Deutschland bislang bestimmt wurden, weisen ein weites Spektrum von Länge und Gewicht auf. Kleine Regenwurmart werden - auch als adulte Tiere - nicht länger als wenige Millimeter und wiegen meist deutlich unter 150 Milligramm (z.B. *Eiseniella tetraedra*). Große Arten wie der *Lumbricus terrestris* werden häufig 2 bis 7 Gramm schwer bei einer Länge von über 30 Zentimetern. Die größte in Baden-Württemberg lebende Art ist der *Lumbricus badensis*, der eine Länge von über 60 cm erreichen kann. *Lumbricus rubellus* nimmt mit einem Gewicht von 40 Milligramm bis 3 Gramm und einer Länge von 7 bis 12 Zentimetern eine Mittelstellung ein.

Die Lebensweise der verschiedenen Regenwurmart ist sehr unterschiedlich. Manche wühlen sich in den Boden, andere kommen eher selten in den mineralischen Bereich der Böden und bevorzugen den Aufenthalt in der Laubstreu bzw. der humosen Auflage von Waldböden. Aufgrund der Lebensweise der Regenwurmart werden drei Lebensformtypen unterschieden:

- die epigäischen Arten, die ganz überwiegend in der Laubstreu vorkommt.
- die endogäischen Arten, die in dem oberen Mineralbodenbereich leben, sich durch den Mineralboden fressen, aber keine dauerhaften Röhren anlegen und
- die anezischen Arten, die als einzige Gruppe tiefreichende Röhrensysteme in Böden anlegen. Zu ihnen gehört die gemeinhin als Regenwurm bezeichnete Art *Lumbricus terrestris*.

Regenwürmer erfüllen im Nährstoffkreislauf von Böden eine herausragende Rolle. Sie bringen durch ihre Fraßtätigkeit die Laubstreu in den Boden ein und versetzen diese bei der Darmpassage mit Mikroorganismen. Die Ausscheidungsprodukte der Regenwürmer sind mit Nährstoffen - insbesondere Phosphor - gegenüber dem Boden um ein Vielfaches angereichert. Der Streuabbau wird durch die Vermischung von mineralischem Bodenmaterial und Mikroorganismen verstärkt in Gang gesetzt und die im Boden gebundenen Nährstoffe werden leichter verfügbar.

Regenwürmer gelten als besonders gut geeignete tierische Biomonitore für metallische Verunreinigungen, da sie die folgenden Kriterien erfüllen:

- Gute Akkumulationseigenschaften für Schwermetalle
- Gut handhabbare Körpermasse
- Weites Verbreitungsspektrum
- Relative Ortstreue
- Hohe Relevanz für ökosystemare Prozesse

Seit Mitte der 1980er Jahre werden von der Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg auf den 60 Walddauerbeobachtungsflächen des Ökologischen Wirkungskatasters Regenwürmer auf Schwermetalle untersucht. Das Ziel dieser Untersuchungen ist es, mit Hilfe des Bioindikators Regenwurm Schadstoffwirkungen auf den Lebensraum Boden mit seiner Biozönose (Bodenlebewelt) zu ermitteln und eine ökotoxikologische Beurteilung der Walddauerbeobachtungsflächen vorzunehmen. Als Beurteilungskriterium dienen die Empfindlichkeit der Regenwürmer gegenüber Schwermetallen (Reaktionsindikatoren) sowie die Anreicherung der Metalle im Wurmkörper (Akkumulationsindikatoren).

2 Materialien und Methoden

Die von der Landesanstalt für Umweltschutz im Rahmen eines Biomonitoringprogrammes untersuchte Regenwurmart - *Lumbricus rubellus* – gehört zu den Streubewohnern. Sie lebt bevorzugt zwischen den Laubblättern oder Nadeln so lange diese feucht bis nass sind. Dort ernähren sich die Regenwürmer von den abgestorbenen Blättern und Nadeln und nehmen über die Fraßstätigkeit Nährstoffe ebenso wie Schadstoffe auf. Auch über die Haut, die ständig mit dem Bodenwasser und den darin gelösten Stoffen in Kontakt ist, werden von *L. rubellus* Nährstoffe und Schadstoffe aufgenommen. In trockenen Zeiten ziehen sie sich unter Baumstämme oder auch in die oberflächennahe Bodenschicht zurück. Dort „fressen“ sie sich durch den Oberboden, in dem sie organische Substanzen (Blätter, abgestorbene Wurzeln, Pilzmycel u.a.m.) und teilweise Bodenmaterial aufnehmen und anschließend wieder ausscheiden.

In der Landesanstalt für Umweltschutz werden Regenwürmer bereits seit 1984 auf Blei und Cadmium untersucht mit Folgeuntersuchungen in den Jahren 1985/86, 1987/88, 1990/93, 1994 und 2000. Ab 1987/88 wurde das Parameterspektrum erweitert um das Schwermetall Zink und ab 1993 um die Schwermetalle Chrom, Kupfer, Mangan, Nickel, Thallium, Vanadium und das Metall Aluminium. Seit 1994 ist auch das Schwermetall Quecksilber im Untersuchungsprogramm.

Die Untersuchungen wurden an insgesamt 49 Standorten durchgeführt. Die Lage der einzelnen Standorte ist der Abbildung 1 zu entnehmen. Die Messwerte der Schwermetallgehalte in den Regenwürmern aus dem Jahre 2000 sind in der Tabelle 1 aufgelistet. Die 49 Standorte verteilen sich über alle Regionen von Baden-Württemberg und fast alle Höhenstufen; von den sandigen Niederterrassenböden um Mannheim (100 m ü NN) bis in die Hochlagen des Südlichen Schwarzwaldes auf etwas über 1000 m ü. NN. Auch decken die Flächen eine große Spanne bei der Bodenreaktion ab; die pH-Werte reichen im Oberboden von sehr sauer (pH-Werte von 3,1) bis alkalisch (pH-Werte von 7,2).

Zur Probennahme wurde unter dem Laub und unter vorsichtig umgedrehtem Totholz der Boden nach Würmern abgesucht. Diese wurden im Gelände vorbestimmt. Pro Fläche sollten 20 bis 30, wenn möglich adulte Tiere gesammelt werden. Die Regenwürmer wurden für den Transport ins Labor in mit gewaschenem Seesand gefüllte PE-Behälter überführt. Während des Transportes zum Labor wurde die Temperatur der Probenbehälter mittels einer vorgekühlten Kühlbox auf 8°C gehalten. Für die chemischen Analysen wurden sämtliche *L. rubellus*-Individuen von einer Fläche zu einer Mischprobe vereinigt.

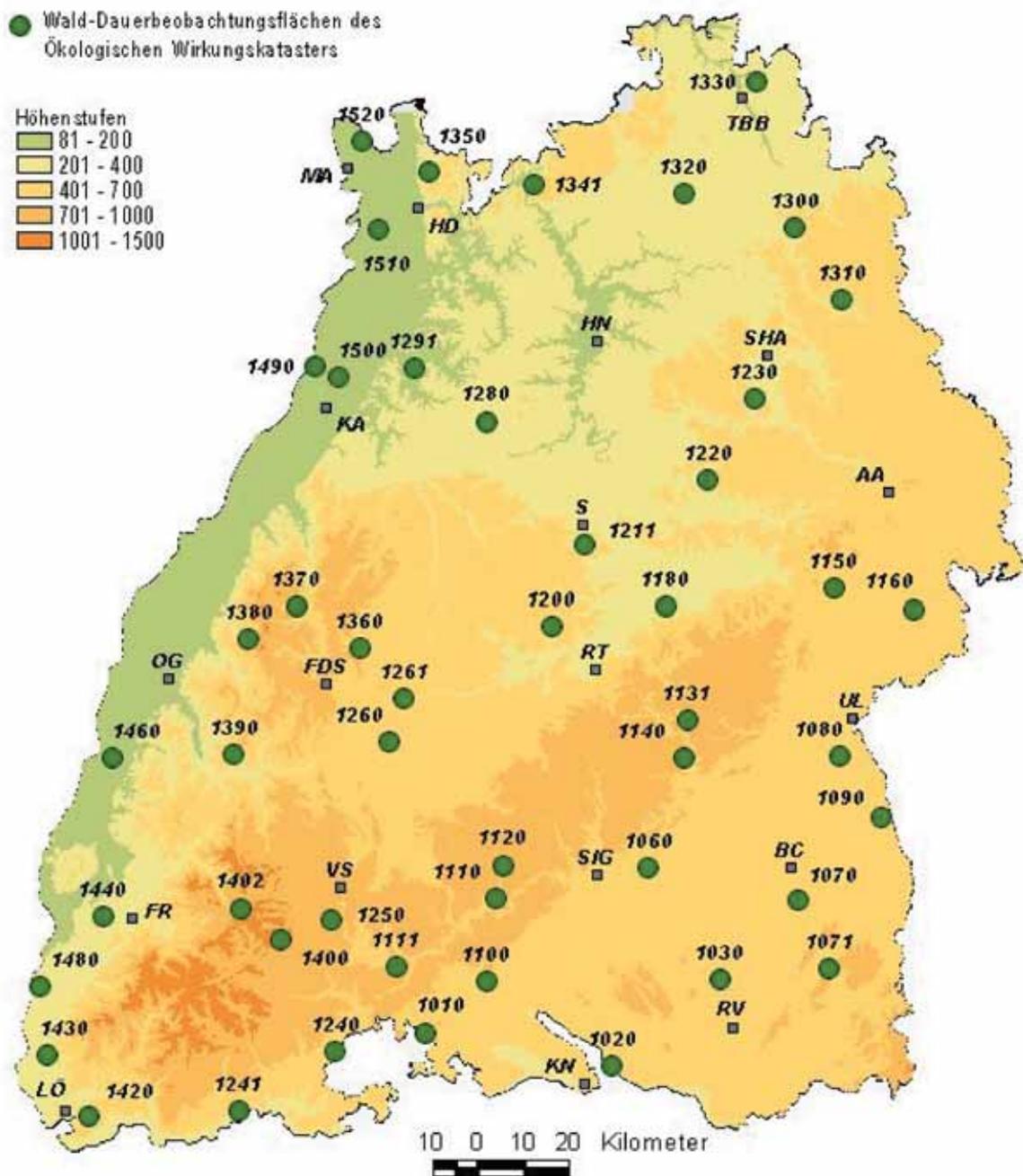


Abb. 1: Lage der Wald-Dauerbeobachtungsflächen des Ökologischen Wirkungskatasters und Fundorte der Regenwurmart *Lumbricus rubellus*. Die den Standortnummern zugehörigen Standortnamen (Gemeinden) sind aus Tab. 1 zu entnehmen.

Table 1: Stoffgehalte der Regenwürmer an den Standorten des Ökologischen Wirkungskatasters Baden-Württemberg

(Werte < BG werden mit der halben BG angegeben)

Standortname/Stoff	Standort	Al	As	Pb	Cd	Cr	Cu	Mn	Ni	Hg	Tl	V	Zn
	Nr.	[mg/kgTS]											
Bestimmungsgrenze (BG)		10	0,30	0,4	0,3	0,3	0,5	3	0,5	0,06	0,150	0,3	5
Engen	1010	290	0,86	0,2	2,1	6,4	5,4	16	48,0	0,07	0,075	1,3	180
Überlingen	1020	600	0,72	2,2	3,6	2,7	4,1	78	2,0	0,18	0,075	1,1	190
Bad Waldsee	1030	390	1,20	1,0	1,7	4,5	3,4	24	41,0	0,18	0,075	1,0	100
Riedlingen	1060	170	0,82	0,7	4,4	1,8	4,4	58	14,0	0,17	0,075	0,7	240
Biberach	1070	580	1,40	1,2	1,9	13,0	11,0	31	190,0	0,12	0,075	1,3	200
Leutkirch	1071	460	1,80	2,3	2,7	3,1	5,3	29	32,0	0,13	0,075	0,9	210
Ulm	1080	160	0,68	1,9	2,7	1,6	5,6	67	18,0	0,20	0,075	0,8	350
Wain	1090	110	1,30	0,7	3,4	2,2	6,1	76	1,9	0,25	0,075	0,7	290
Stockach	1100	220	1,00	0,9	3,7	2,5	4,2	50	0,8	0,18	0,075	0,7	250
Wehingen	1110	410	0,66	1,0	10,0	2,4	4,2	35	1,1	0,20	0,075	1,0	160
Immendingen	1111	310	0,58	0,9	7,5	2,0	3,8	25	1,3	0,25	0,075	1,1	300
Balingen	1120	310	0,85	0,7	4,6	5,3	4,1	25	77,0	0,14	0,075	0,8	190
Münsingen	1131	690	1,40	1,1	2,4	2,1	3,6	20	1,9	0,09	0,180	2,3	160
Zwiefalten	1140	420	1,20	0,7	4,6	5,2	3,3	30	1,0	0,13	0,075	0,9	190
Steinheim	1150	310	1,10	0,9	4,8	2,7	4,4	36	28,0	0,20	0,075	0,9	160
Giengen	1160	280	1,20	1,4	4,7	2,1	13,0	34	10,0	0,31	0,075	1,0	450
Kirchheim Teck	1180	210	1,10	1,3	3,8	1,5	3,8	120	0,8	0,27	0,075	0,9	190
Bebenhausen	1200	100	1,00	0,9	4,5	1,4	4,1	56	13,0	0,26	0,075	0,6	230
Stuttgart	1211	140	0,76	1,3	3,3	5,7	4,6	110	44,0	0,22	0,075	0,7	240
Welzheim	1220	210	0,87	36,0	6,2	1,6	4,5	120	0,8	0,21	0,075	0,8	240
Schwäbisch Hall	1230	110	1,00	8,6	3,7	1,2	5,4	87	5,8	0,24	0,075	0,6	280
Stühlingen	1240	51	0,41	0,2	0,8	1,0	5,9	13	0,3	0,09	0,075	0,8	270
Waldshut-Tiengen	1241	240	0,50	7,2	3,1	2,3	5,0	80	1,1	0,32	0,075	0,9	230
Donaueschingen	1250	420	1,80	1,4	3,0	3,4	3,0	14	46	0,17	0,075	0,8	510
Sulz	1260	250	1,00	1,0	2,1	2,8	3,6	33	1,2	0,18	0,075	0,8	160
Horb	1261	190	2,30	0,7	3,1	2,6	4,3	21	1,8	0,20	0,075	0,7	190
Maulbronn	1280	230	1,00	0,5	5,0	3,0	4,8	43	1,7	0,17	0,075	1,0	260
Bruchsal-Ost	1291	82	0,85	0,6	3,8	3,1	4,6	75	1,6	0,19	0,075	0,9	270
Künzelsau	1300	470	0,84	0,8	2,3	1,9	4,4	41	1,2	0,13	0,075	1,1	210
Crailsheim	1310	11	1,50	0,4	2,8	0,8	4,8	21	0,3	0,07	0,075	0,7	340
Hardheim	1320	570	0,84	1,5	3,1	4,2	3,9	82	1,4	0,17	0,075	1,2	190
Tauberbischofsheim	1330	430	0,93	0,8	2,9	2,5	4,3	59	1,3	0,15	0,075	0,9	180
Eberbach	1341	250	1,30	24,0	3,0	3,6	4,9	40	1,1	0,32	0,075	0,7	220
Schriesheim	1350	230	1,30	15,0	3,1	7,1	4,8	81	2,6	0,30	0,075	1,0	210
Pfalzgrafeweiler	1360	310	0,93	35,0	3,2	3,7	4,0	54	44,0	0,22	0,075	1,0	300
Murgschifferschaft	1370	360	1,60	280,0	5,4	4,5	3,9	33	1,3	0,15	0,240	1,1	280
Ottenhöfen	1380	300	1,70	67,0	5,2	2,6	4,5	47	41,0	0,30	0,220	0,8	320
Hausach	1390	350	0,92	13,0	4,3	11,0	8,9	80	7,6	0,22	0,075	1,1	300
Donaueschingen	1400	180	1,80	15,0	3,9	1,7	4,5	51	1,4	0,20	0,075	0,7	220
Furtwangen	1402	420	1,20	69,0	4,8	3,1	8,5	53	2,5	0,22	0,220	1,2	280
Bad Säckingen	1420	89	2,60	0,5	4,0	0,8	4,3	49	0,8	0,12	0,075	0,7	220
Kandern	1430	380	0,85	1,3	2,7	2,1	4,7	00	1,5	0,16	0,075	1,1	210
Freiburg	1440	120	0,59	1,6	3,1	2,5	4,1	83	1,5	0,17	0,075	0,7	220
Lahr	1460	150	0,57	0,9	1,8	2,7	3,8	19	1,4	0,14	0,075	0,8	170
Müllheim	1480	150	0,66	0,4	1,4	2,1	5,3	26	1,1	0,13	0,075	0,8	250
Karlsruhe Auwald	1490	220	2,20	0,8	1,3	4,3	4,5	21	1,6	0,15	0,075	1,0	220
Karlsruhe Hardtwald	1500	140	0,34	1,4	1,7	10,0	5,0	58	3,9	0,13	0,075	0,7	230
Schwetzingen	1510	330	1,20	1,7	3,8	3,2	4,5	77	4,9	0,19	0,075	1,1	180
Mannheim	1520	140	0,71	6,0	2,7	4,4	5,0	140	4,9	0,24	0,075	0,7	200

3 Entwicklung der Schadstoffgehalte in Regenwürmern

Über den gesamten Untersuchungszeitraum liegen für Hg maximal 2 Messdaten pro Standort, für Cr, Cu, Mn, Ni, Tl, V und Al maximal 3 Messdaten pro Standort, für Zn maximal 4 Messdaten pro Standort und für Pb und Cd maximal 5 Messdaten pro Standort in einer Zeitreihe vor. Für die Darstellung der Entwicklung der Schadstoffgehalte in Regenwürmern seit Beginn der Untersuchungen im Jahre 1984 werden hier die Veränderungen der beiden Schadstoffe mit der höchsten Zahl an Messzeitpunkten (Blei und Cadmium) als Trendbeobachtungen aufgeführt. Für die Mediane ergibt sich eine eindeutige Abnahme von Untersuchungsjahr zu Untersuchungsjahr (Abb. 2).

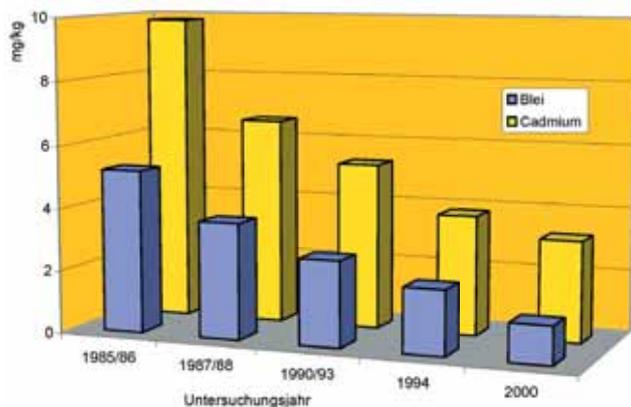


Abb. 2: Zeitreihe der Blei- und Cadmiumgehalte (Medianwerte in mg/kg TS) in Regenwürmern (*L. rubellus*) in den Jahren 1985/86 bis 2000

Die standörtlichen und regionalen Veränderungen der Blei- und Cadmiumgehalte in den Regenwürmern sind in den beiden Karten (Abb. 3 und 4) dargestellt. Der Überblick zeigt bei Blei zum einen, dass die Gehalte in den Regenwürmern vieler Standorte der Gäulandschaften, der Hügel- und Bergländer des Keupers, der Schwäbischen Alb und des Alpenvorlandes, des Rheintales, aber auch der Standorte in der Nähe von Ballungsgebieten auf niedrigem Niveau schwanken. Auffällig dagegen sind zum anderen die erhöhten bis stark erhöhten Bleigehalte in Regenwürmern aus der Anfangszeit dieser Untersuchungen in den Regionen Schwarzwald und Odenwald. Hier fanden deutliche Veränderungen bis zum Jahre 2000 statt. An allen Flächen des Schwarzwaldes und des Odenwaldes

sind die Bleigehalte im Jahre 2000 deutlich niedriger als noch 1985/86, an etwas mehr als der Hälfte der Standorte auch niedriger als 1987/88 und an knapp der Hälfte dieser Standorte auch gegenüber 1994. Generell kann gesagt werden, dass die Bleigehalte in Regenwürmern, soweit sie 1985/86 nicht ohnehin auf niedrigem Niveau lagen, seit Mitte der 80er Jahre deutlich abgenommen haben und - bis auf einzelne Ausnahmen - einen insgesamt niedrigen Konzentrationsbereich erreicht haben.

Die Abnahmen betragen allein zwischen 1985/86 und 2000 bei Blei im Durchschnitt aller Standorte etwas mehr als 75 Prozent.

An den in den 1980er Jahren besonders hoch belasteten Standorten mit ursprünglich mehr als 50 mg Pb/kg Regenwurm betragen die Abnahmen sogar bis 95 Prozent.

Für Cadmium sind durchschnittliche Abnahmen von über 30 Prozent ermittelt worden. In den von Bodenversauerung besonders betroffenen Gebieten des Odenwaldes und des Schwarzwaldes wurden durchweg Abnahmen im Cadmiumgehalt von 30 bis fast 70 Prozent gemessen. In der Gruppe der ehemals besonders belasteten Regenwurmhabitate mit mehr als 5 mg Cd/kg Regenwurm wurden überdurchschnittlich hohe Abnahmen gemessen.



Abb. 3: Trendbeobachtung der Bleigehalte in Regenwürmern an den Standorten des Ökologischen Wirkungskatasters auf der Kartengrundlage von Bodenregionen

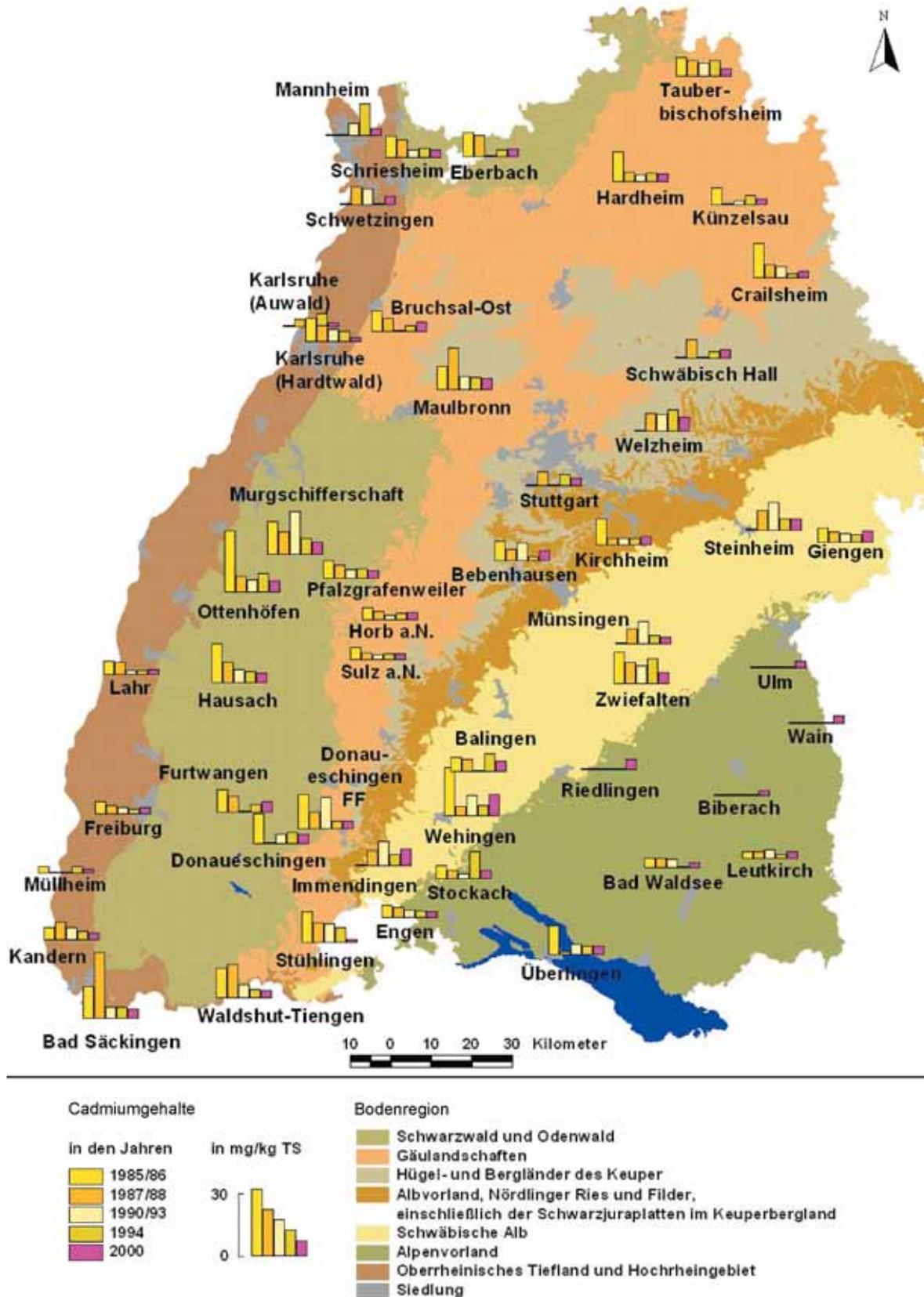


Abb. 4: Trendbeobachtung der Cadmiumgehalte in Regenwürmern an den Standorten des Ökologischen Wirkungskatasters auf der Kartengrundlage von Bodenregionen

Es hat in den letzten 15 Jahren somit eine spürbare Verringerung der Belastung der Regenwürmer im Hinblick auf die Schadstoffe Blei und Cadmium, aber auch Zink stattgefunden.

Aus dem abnehmenden Trend lässt sich eine Entlastung der Bodenbiozönose ableiten. Darüber hinaus decken sich diese Ergebnisse auch mit Befunden aus anderen Untersuchungen. Bei der Entwicklung der Schadstoffgehalte in epiphytischen Moosen zeichnen sich Parallelen zu der von Regenwürmern ab, wobei in einigen Fällen standortbezogene und regionale Unterschiede festzustellen sind. Moose eignen sich besonders gut zur Indikation von immissionsbedingten Einträgen, weil sie ihren Nährstoffbedarf direkt und ausschließlich durch die Aufnahme aus der Atmosphäre beziehen. Sie werden deshalb von der Landesanstalt für Umweltschutz seit 1990 an den Wald-dauerbeobachtungsflächen untersucht. Die Ergebnisse der Beobachtungsjahre 1990, 1995 und 2000 sind für eine Reihe von Schwermetallen in den Umweltdaten 2003 des Landes Baden-Württemberg dokumentiert.

Zwar gingen die Schadstoffgehalte in den Moosen ebenso wie bei den Regenwürmern seit 1990 auf den meisten Flächen kontinuierlich zurück, doch ist dieser Rückgang in den versauerungsgefährdeten Gebieten des Odenwaldes und des Schwarzwaldes bei den Regenwürmern deutlich höher, so dass der Rückgang nicht nur auf Verbesserungen in der Immissions-situation zurückzuführen ist, sondern, daraus resultierend, auch auf eine Verbesserung der Bodenverhältnisse.

Auch Untersuchungen zur Belastung von Menschen in Deutschland bestätigen diese Ergebnisse. Das Umweltbundesamt veröffentlichte in seiner Broschüre „Umwelt und Gesundheit in Deutschland“ eine Grafik (Abb. 5) zur Entwicklung der menschlichen Bleibelastung (UBA 2004a).

Die Gehalte an Blei, Cadmium und Zink in Regenwürmern haben seit den 1980er Jahren deutlich abgenommen

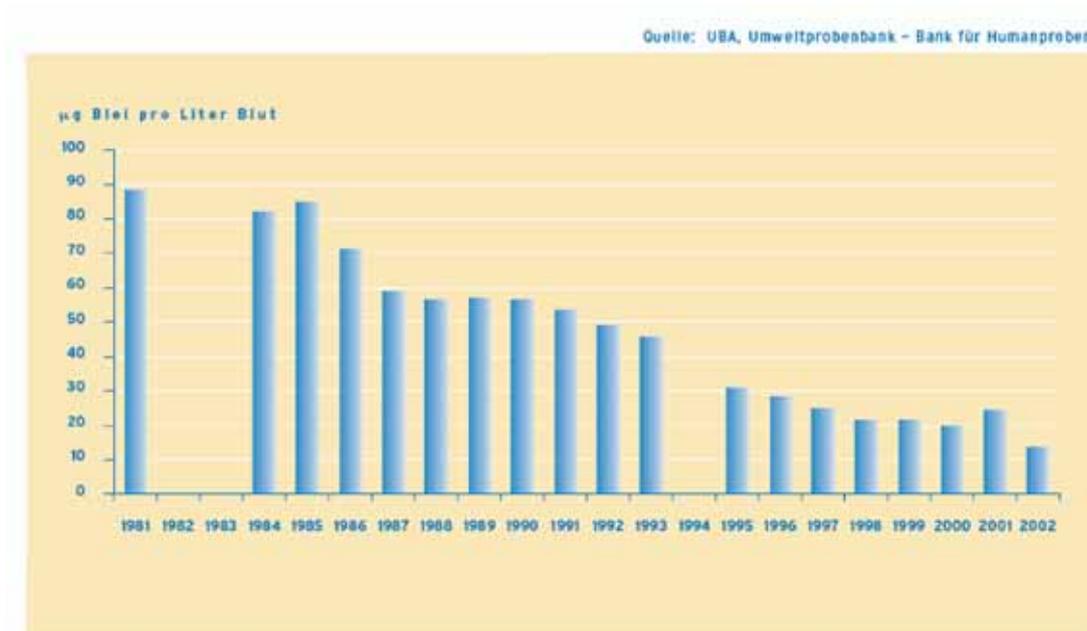


Abb. 5: Bleibelastungen des Menschen, Nachweis von Blei in Blutproben von Studentenkollektiven der Universität Münster

4 Ökotoxikologische Bewertung

Der Boden besitzt eine wichtige Funktion als Lebensraum für Bodenorganismen. Um zu prüfen, ob der Boden unter den gegebenen Belastungen noch diese Funktion erfüllen kann, wurde am Beispiel des Regenwurms eine ökotoxikologische Bewertung des Bodens vorgenommen. Diese basiert auf drei so genannten Stützwerten:

- dem Hintergrundwert (H); er beschreibt die natürliche Konzentration der Metalle im Boden, die vom Boden bildenden Ausgangsgestein abhängig ist
- dem Prüfwert (P); er charakterisiert die Schwermetallkonzentration im Boden, die für die Regenwürmer selbst bei chronischer Einwirkung noch nicht toxisch ist, ab der aber eine Wirkung zu erwarten ist (Wirkungsschwelle)
- dem Letalwert (L); er stellt die Schwermetallkonzentration im Boden dar, die bei kurzzeitiger Einwirkung eine 50%ige Mortalität bei Regenwürmern zur Folge hat (LC 50-Wert).

Die Böden der 60 Wald-Dauerbeobachtungsflächen wurden dem jeweils vorliegenden Ausgangsgestein zugeordnet und hierfür wurden die jeweiligen Hintergrundwerte (H) bestimmt. Die Prüf- und Letalwerte wurden für die Metalle Cd, Cu, Pb, Ni und Zn aus der Literatur ermittelt. Um die Schädlichkeit der Metallkonzentrationen für ein bestimmtes Schutzgut (hier den Regenwurm) zu vergleichen, werden die entsprechenden Konzentrationen für H, P und L einer Bewertungsskala (Risiko-Index r) zugeordnet und als Risiko-Kennlinien abgebildet (Kapitel 5). In Abbildung 6 werden diese für Cadmium- und Bleikonzentrationen dargestellt.

Die Abbildung 6 zeigt den Vergleich einer Cadmium-Belastung mit einer Blei-Belastung des Bodens. Es wird deutlich, dass bei chronischer Einwirkung Cadmium 40-fach toxischer für Regenwürmer ist als Blei. Das geht aus der Lage der jeweiligen Prüfwerte (P = Übergang von gelb nach orange) auf der Abszisse hervor. Im Hinblick auf die akute Toxizität (L) besteht jedoch nur ein 2,3-facher Unterschied, da die Risiko-Kennlinie des Bleis in der obe-

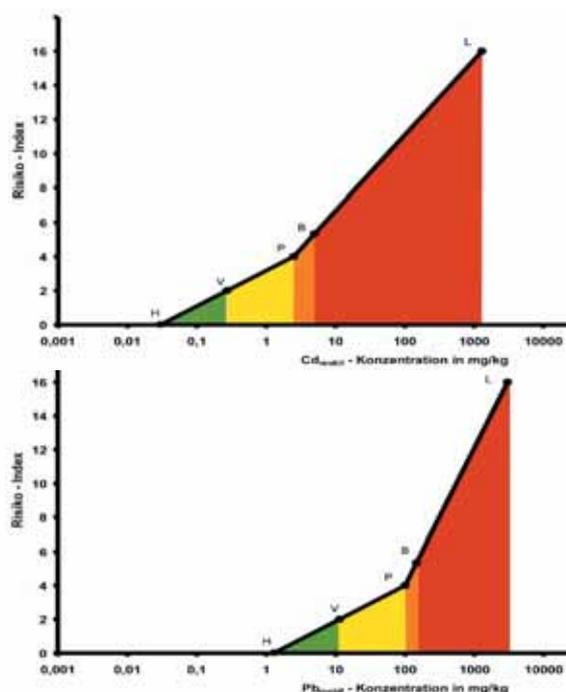


Abb. 6: Umwelttoxikologischer Vergleich von Cadmium und Blei über Risiko-Kennlinien.

Der Hintergrundwert (H) zeigt den Bereich an (grün), der keine Schädwirkung auf den Regenwurm erwarten lässt. Der Prüfwert (P), Übergang von gelb zu orange, entspricht der Wirkungsschwelle chronischer Toxizitätstests. Der L-Wert beschreibt die kurzzeitig tödlich wirkenden Konzentration (50%-Mortalität). Auf halber Strecke zwischen H und P kann ein Vorsorgewert (V) definiert werden (Übergang von grün zu gelb). Zwischen P und L (Übergang von orange zu rot) wird der Belastungswert (B) dargestellt.

ren Zone steiler verläuft. Daraus ergibt sich beim Blei zwischen dem Prüfwert und dem Belastungswert ein schmalerer Toleranzbereich (orangefarben).

Wendet man dieses Bewertungsverfahren auf den Wald-dauerbeobachtungsflächen an, so ergeben sich für diese keine bis geringe Belastungen für die Metallkonzentrationen Cd, Cu, Pb, Ni und Zn (siehe Abb. 7). Von einer hohen Schadstoffbelastung im Boden kann vor dem Hintergrund dieser Ergebnisse nicht gesprochen werden.

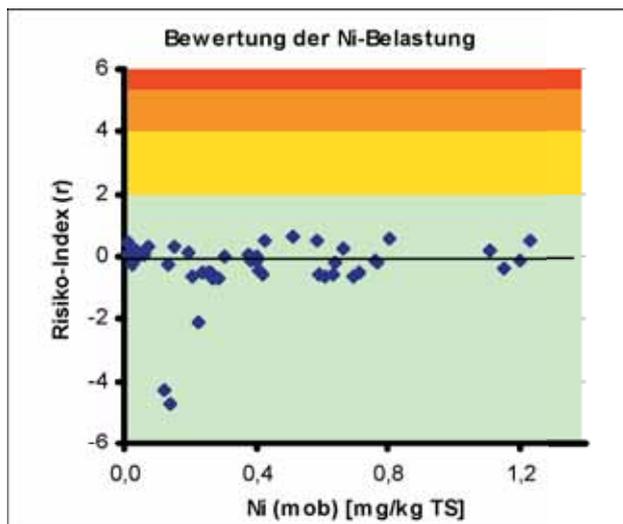
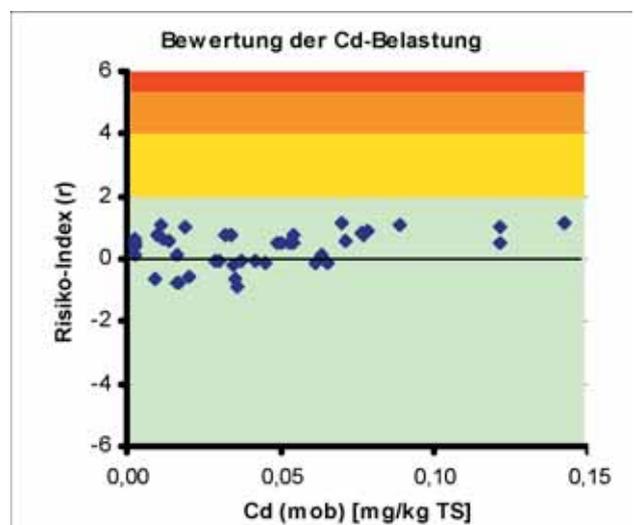
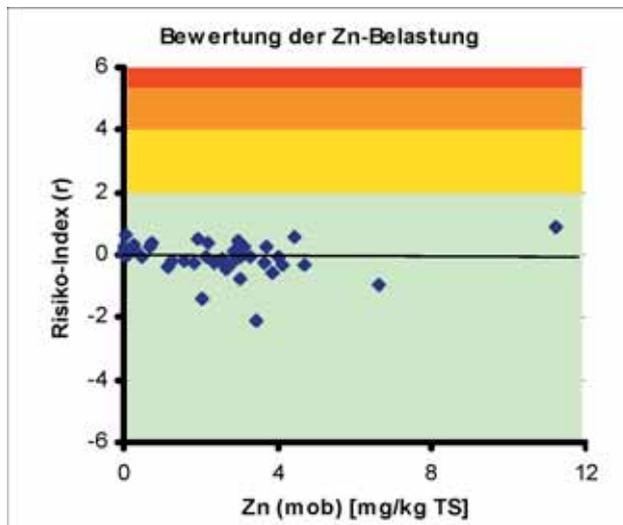
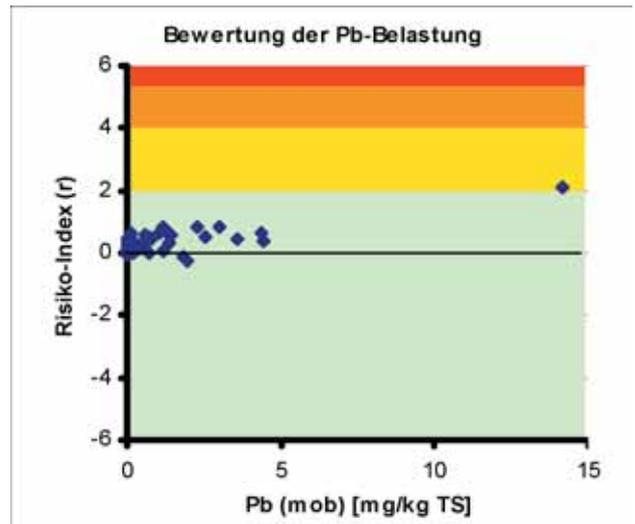
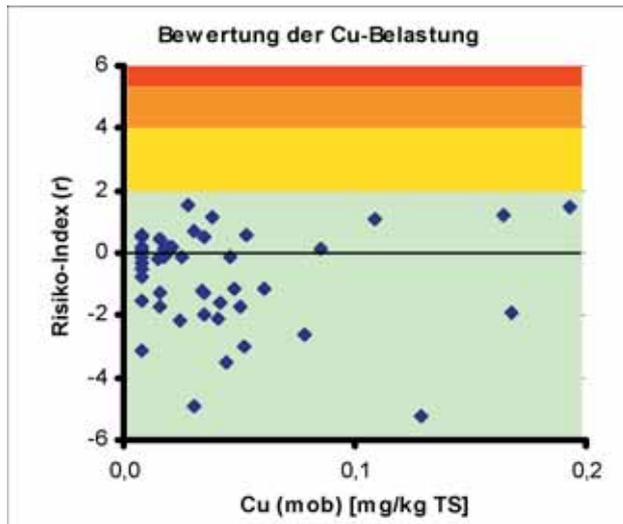


Abbildung 7: Bewertung der Schwermetallbelastung der Böden der Walddauerbeobachtungsflächen im Jahr 2003

Dargestellt ist der Risiko-Index in Abhängigkeit vom Gehalt an mobilem Kupfer, Cadmium, Zink, Blei und Nickel im Oberboden. Die Metallgehalte streuen gleichmäßig um die Nulllinie (Hintergrund). Nur Blei liegt mit seinem Schwerpunkt leicht über Null ($r = 0,35$ im Mittel).

Die Walddauerbeobachtungsflächen weisen keine bis geringe Belastungen durch die Metalle Cd, Cu, Pb, Ni und Zn auf.

Wegen des stetigen, geringen Eintrages von Schwermetallen durch die atmosphärische Deposition ist die Fortführung der Dauerbeobachtung in reduziertem Umfang aber weiterhin notwendig, um ggfs. erneut Minderungsmaßnahmen empfehlen zu können.

Die Dauerbeobachtung bekommt zusätzliche Bedeutung, da neue Erkenntnisse des Umweltbundesamtes belegen, dass verschiedene hochwirksame Chemikalien, die in Wasser und Boden vorkommen, selbst in geringen Konzentrationen schädliche Wirkungen auf Lebewesen ausüben (UBA 2004b). Dies konnte mit neuen ökotoxikologischen Testsystemen, die bisher noch nicht für Routineuntersuchungen eingeführt sind, nachgewiesen werden.

Die oben beschriebenen Untersuchungen beurteilen die Schädlichkeit von Metallkonzentrationen im Boden für Bodenlebewesen, hier am Beispiel des Regenwurmes. Im Folgenden wird der Frage nachgegangen, inwieweit sich Metalle in Bodenlebewesen anreichern und damit in der Nahrungskette weitergegeben werden können.

Um diese Akkumulationsfähigkeit bei Regenwürmern für Schwermetalle zu prüfen, wurden neben den Wald-Dauerbeobachtungsflächen zusätzliche Standorte mit nur einer einzigen Schwermetallbelastung (Monobelastung) ausgewählt. Untersucht wurden in den Jahren 2002 und 2003 Standorte, die in der Vergangenheit mit chromhaltigen Abfällen aus einer Gerberei, mit cadmiumhaltigen Ablagerungen aus einem Emailierbetrieb oder mit kupferhaltigen Fungiziden aus dem Hopfenanbau beaufschlagt worden waren.

Im Körper der Regenwürmer von den mit Gerbereiabfällen kontaminierten Standorten fand sich signifikant mehr Chrom als auf den übrigen Flächen, wenn auch bei vier- bis fünffach erhöhten Chromgehalten im Oberboden (Cr_{gesamt} bzw. Cr_{mobil}) die Körperkonzentrationen nur etwa auf das Doppelte erhöht waren. Ebenso spiegelte sich eine Cadmium- bzw. Kupferbelastung der Oberböden in einer deutlich erhöhten Metallkonzentration in den Regenwürmern wieder (Abb. 8).

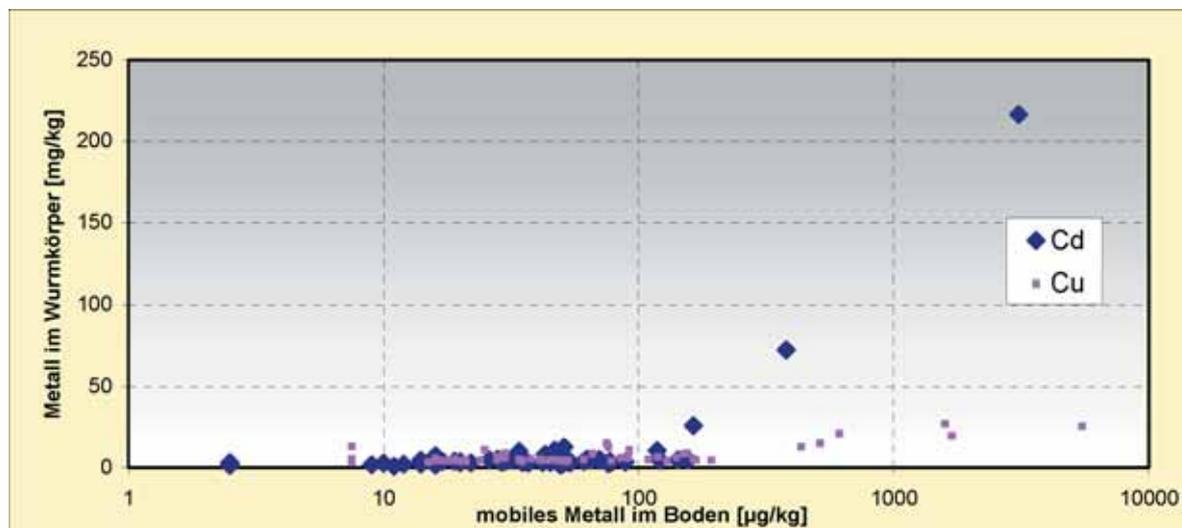


Abb. 8: Akkumulation von Cadmium und Kupfer im Wurmkörper

In Abbildung 8 wurden die Daten der Wald-Dauerbeobachtungsflächen und der belasteten Flächen aufgetragen (n = 67). Deutlich ist zu erkennen, dass bei Cadmium unterhalb von ca. 200 µg/kg mobilem Metall im Boden die Konzentration im Wurmkörper nicht ansteigt. Oberhalb dieses Wertes akkumuliert der Regenwurm dieses Metall deutlich zunehmend. Bei Kupfer liegt dieser Schwellenwert bei ca. 300 µg/kg. Als Schwellenwert für chronisch toxische Wirkungen wurden 310 µg mobiles Kupfer bzw. 2500 µg mobiles Cadmium pro Kilogramm Boden ermittelt.

Die Grafik 8 zeigt ebenfalls, dass die untersuchten Schwermetalle unterschiedlich akkumuliert werden. Bei Cadmium wurde eine ca. 100fache Anreicherung beobachtet, dagegen stiegen die Kupfergehalte im Körper der Würmer von belasteten Flächen nur auf das ca. Dreifache an. Als Erklärung für diesen Unterschied könnte die physiologische Funktion der Schwermetalle dienen: Während homöostatische Mechanismen der Würmer für mehr oder weniger konstante Gehalte des essentiellen Metalls Kupfer sorgen, haben die Tiere einer Anflutung des nicht-essentiellen Cadmiums nichts entgegen zu setzen. Auch das essentielle Metall Chrom passt mit seiner nur geringen Akkumulationsneigung in dieses Erklärungsmodell.

Regenwürmer akkumulieren Schwermetalle erst ab einer bestimmten Konzentration im Boden, dann aber zunehmend und je nach Metall unterschiedlich stark

Diese Beobachtungen zeigen, dass zur genaueren Festlegung von Schwellenwerten der Akkumulationsfähigkeit für bisher nicht untersuchte Elemente (u.a. Arsen, Chrom, Nickel, Quecksilber) noch Forschungsbedarf besteht. Diese genannten Elemente werden über Immissionen in Waldökosysteme eingetragen.

5 Darstellung der Risikokennlinien

Nachfolgend sind die Risiko-Kennlinien für Kupfer, Cadmium, Nickel, Blei und Zink (in der Reihenfolge ihrer chronischen Toxizität für Regenwürmer) dargestellt. Die Zuordnung charakteristischer Bodengehalte einzelner Stoffe zu einer einheitlichen Bewertungsskala (Risiko-Index r) ermöglicht den Vergleich unterschiedlicher Schadstoffe im Hinblick auf ihre Schädlichkeit für ein bestimmtes Schutzgut (hier den Regenwurm) und ihre ökotoxikologische Bewertung. Dies ist das Konzept der sogenannten Risiko-Kennlinie.

Die Skaleneinteilung des Risiko-Index ist im Prinzip willkürlich. Sie lehnt sich aus historischen Gründen an das früher im Land Baden-Württemberg angewendete formale Altlastenbewertungsverfahren an. Ausführlicher ist dieses Verfahren in v.d. Trenck & Jaroni (1999) sowie den Vorläufer-Publikationen erläutert (v.d. Trenck et al., 1993a+b; v.d. Trenck & Ruf, 1994; v.d. Trenck et al., 1994).

Der Abstand zwischen H und P gibt den Spielraum für vorsorgendes Handeln an. So kann auf halber Strecke zwischen H und P ein Vorsorgewert definiert werden (V, $r = 2$). Der Bereich zwischen V und P (gelb) ist dann als Besorgnisbereich anzusprechen.

Der Letal-Wert (L, $r = 16$) entspricht einer in der Umwelt bei kurzfristiger Einwirkung tödlich wirkenden Konzentration. Durch den L-Wert wird die Steilheit der Kennlinie im oberen Bereich festgelegt. Aus dem Abstand zwischen P und L lassen sich bei Prüfwertüberschreitungen Maßnahmenwerte ableiten (Spielraum für nachsorgendes Handeln). So ergibt sich der Belastungswert (B) bei $r = 5,3$. Die (orange-farbene) Zone zwischen P und B gibt den Toleranzbereich des Prüfwertes an.

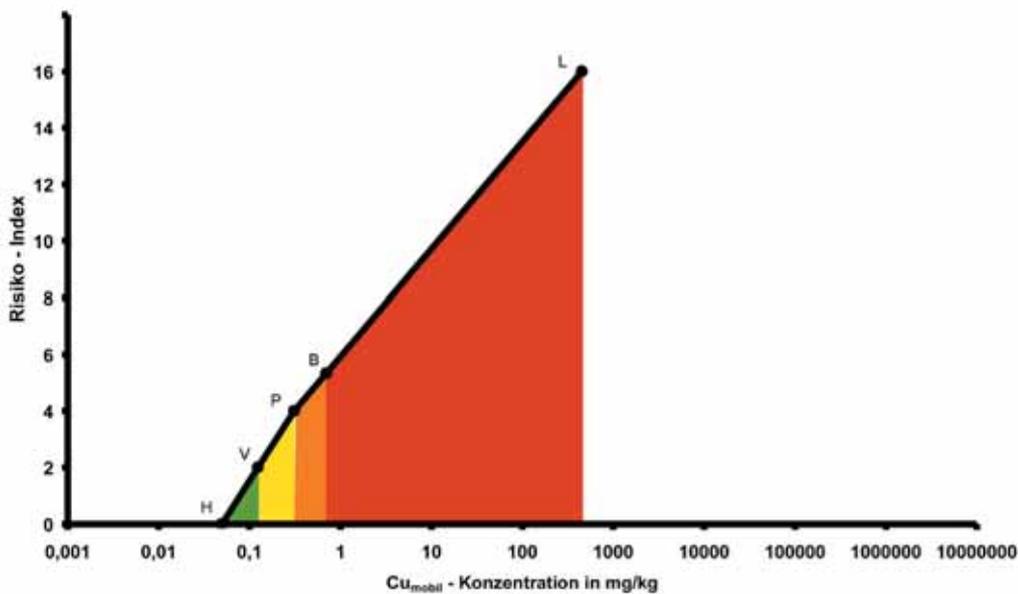


Abb. 9: Risiko-Kennlinie für Kupfer

Der Hintergrundwert (H, $r = 0$) und der umliegende Bereich (grün) ist durch ein vernachlässigbares Risiko gekennzeichnet. Der Prüfwert (P, $r = 4$) entspricht einem tolerierbaren Risiko. Die biologische Grundlage für den P-Wert ist die Wirkungsschwelle im chronischen Test, z.B. mit Regenwürmern.

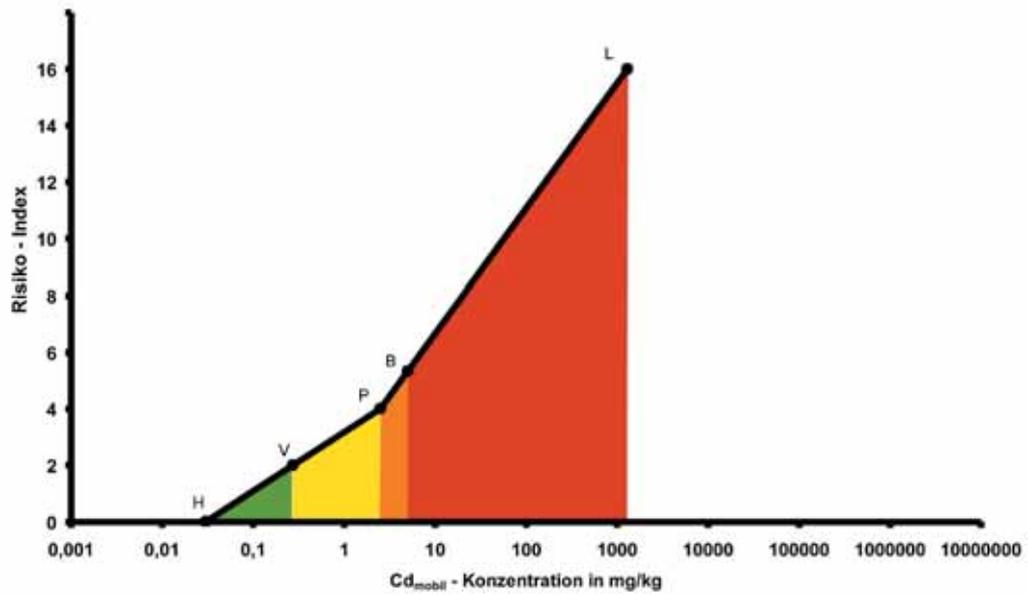


Abb. 10: Risiko-Kennlinie für Cadmium

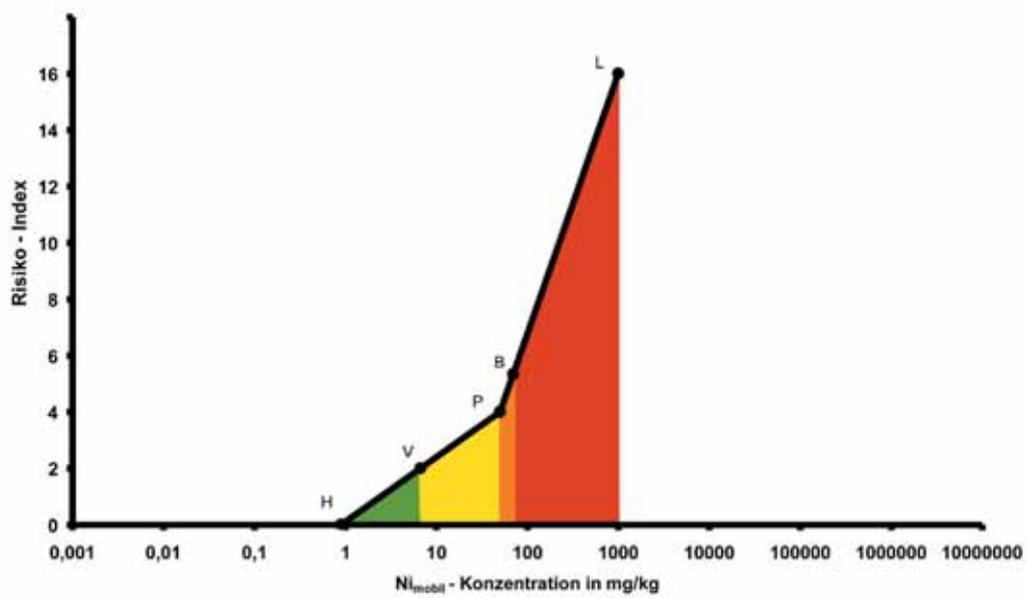


Abb. 11: Risiko-Kennlinie für Nickel

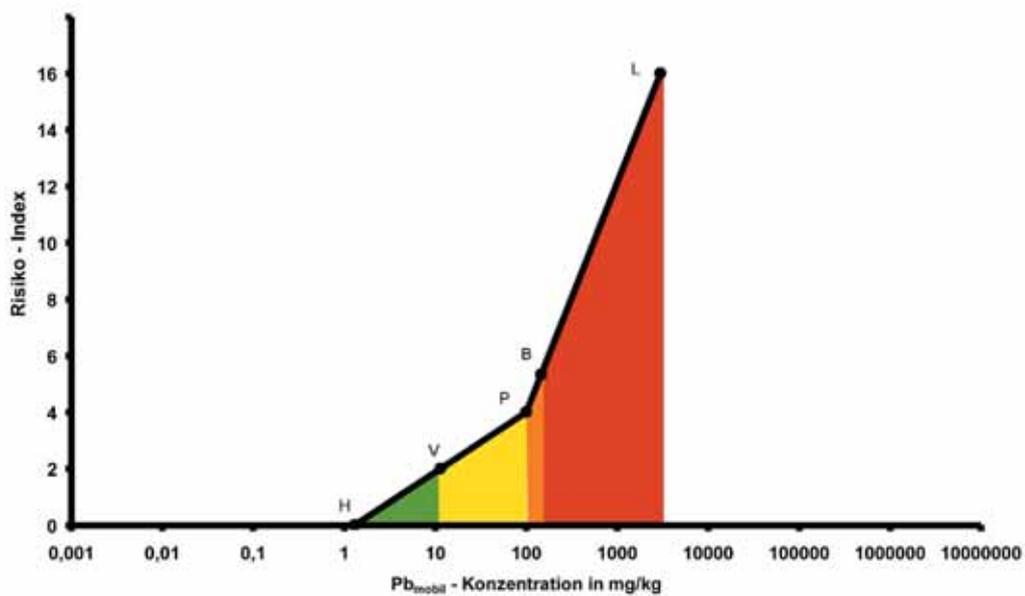


Abb. 12: Risiko-Kennlinie für Blei

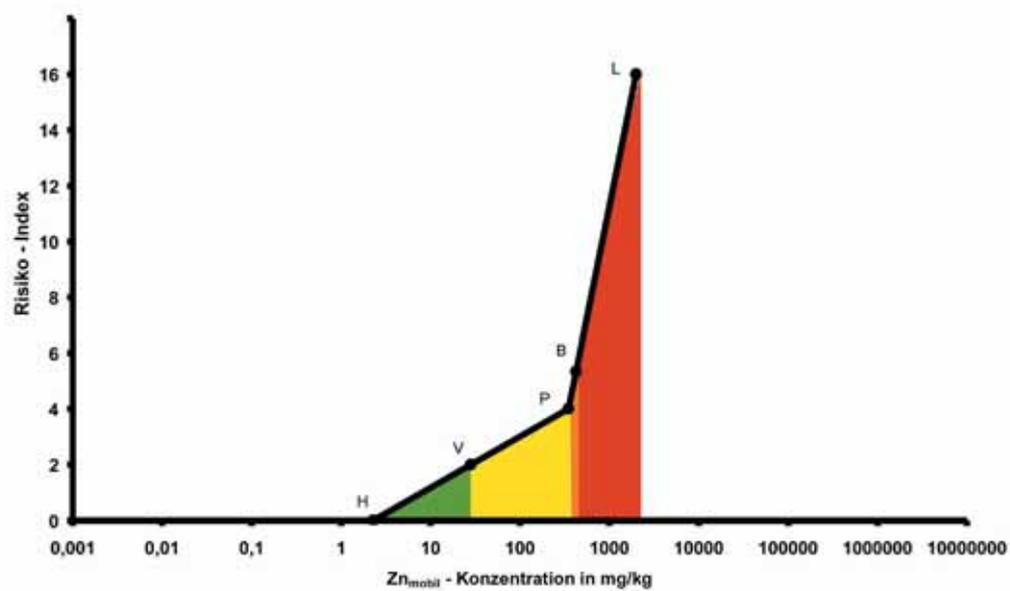


Abb. 13: Risiko-Kennlinie für Zink

Die verwendeten Kriterien (Stützstellen) sind aus anderen Bewertungsansätzen bekannt; neu ist ihre problemgerechte Verknüpfung. Damit ist die Risiko-Kennlinie ein Werkzeug zum Management von Schadstoffen in der Umwelt. Sie bietet:

- eine übersichtliche Darstellung einheitlich abgeleiteter Handlungsschwellen (Vorsorgewerte, Prüfwerte, Maßnahmenwerte)
- die Möglichkeit der Priorisierung kontaminierter Flächen oder Bereiche,
- einen Maßstab zum Vergleich unterschiedlicher Schadstoffe und zu ihrer Aggregation in Wirkungsbilanzen.

UBA (2004a) Umwelt und Gesundheit - Beispiele aus dem täglichen Leben. Umweltbundesamt, Berlin, April 2004, 75 S.

UBA (2004b) Entwicklung und Validierung eines *Caenorhabditis elegans* Biomonitoring-Tests auf DNA-Ebene zur Prüfung von Arzneimitteln, Bioziden und anderen Chemikalien. Forschungsbericht von R. Menzel & K. Reichert, Institut für Biologie der Freien Universität Berlin, im Auftrag des Umweltbundesamtes, Berlin, UFOPLAN 20167428, 158 Seiten.

6 Literatur

K.T. v.d. Trenck, J. Ruf & H.H. Dieter (1993a) Integriertes Risiko-Management am Beispiel Altlasten. In: H. Fiedler, R. Demuth, R.E. Lob und O. Hutzinger, Hrsg., „Tagungsband 3 der Eco-Inforna '92“, ECO-INFORMA Press, Bayreuth, 279-293

K.T. v.d. Trenck, J. Ruf & H.H. Dieter (1993b) Zusammenführung von Altlastenbewertung und Sanierungszielfindung. UWSF - Z. Umweltchem. Ökotox. 5, 135-144

K.T. v.d. Trenck & J. Ruf (1994) Grundlagen der konzentrationsbezogenen Bewertung anhand von Risiko-Kennlinien. Vortrag auf Kongreß 29 „Grundwassersanierung“ im Rahmen des Umwelttechnologieforums UTECH Berlin 1994, IWS-Schriftenreihe Band 19, Erich Schmidt Verlag, Berlin, 111-127

K.T. v.d. Trenck, J. Ruf & M. Flittner (1994) Guide values for contaminated sites in Baden-Württemberg. ESPR - Environ. Sci. & Pollut. Res. 1, 253-261

K.T. v.d. Trenck & H. Jaroni (1999) Vergleichende Bewertung von Umweltschadstoffen anhand von Risiko-Kennlinien. In: G. Rippen, Hrsg., „Handbuch Umweltchemikalien“, Band 1, II-1.2.1, S. 1-116 + Anhang (56. Erg. Lfg. 9/01), ecomed Verlag, Landsberg

