

Ein Modell zur Übertragung ökotoxikologischer Labordaten über Bodentiere auf Freilandpopulationen

Gerd Weigmann

Synopsis

Many ecotoxicological tests on soil animals in the laboratory have been made to calculate the risks of environmental pollution. Nevertheless it is difficult to transfer e. g. data of mortality or of population decrease from the laboratory to the field situation. In this contribution a simple model has been created that simulates fluctuations of standardized populations of soil collembola, modified by probability generated variations. If mortality data from laboratory experiments superimpose these fluctuations it is possible to calculate probabilities of extinction of field populations.

Ecotoxicology, soil animals, soil pollution tests, population model, field experiment simulation

1. Einleitung

Im Sinne eines präventiven Umweltschutzes bestehen Aufgabe und Ziel der Ökotoxikologie darin, die von chemischen Stoffen (Umweltchemikalien) ausgehenden Veränderungen für Populationen, Biozönosen, Ökosysteme und letztlich für die gesamte Biosphäre abzuschätzen" (MATHES & WEIDEMANN 1991). Ein Hintergrund von standardisierten Labortests zur Wirkung von Chemikalien z. B. auf terrestrische Biozönosen und ihre Populationen (Regenwürmer, Collembolen u. a.) sind das Chemikaliengesetz (ChEMG 1980) und das Pflanzenschutzgesetz (PflSCHG 1968), die beispielsweise Bodentiere vor unerwünschten Nebenwirkungen bewahren sollen.

Anlaß dieser Modellstudie waren solche Laborversuche zur subakuten Wirkung von Chemikalien auf Collembolen-Populationen der Standardtestart *Folsomia candida* (WILLEM, 1902), die definierte Mortalitäten durch Chemikalien während der Embryonal- und Juvenil-Phase erbrachten, dies bei Konzentrationen unterhalb einer akuten Wirkungsschwelle (LC-50 in Kurzzeit-Tests) (JANCKE 1989, RIEPERT 1989, WOHLGEMUTH 1991). Wie kann man jedoch aus der Chemikalienwirkung auf eine altersstandardisierte Laborpopulation die Wirkung auf eine Freilandpopulation ableiten? Wieviel zusätzliche, chemikalienbedingte Mortalität und Nachkommensverluste trägt eine durchschnittliche Freilandpopulation, ohne kurz- oder mittelfristig auszusterben? Wie können also derartige ökotoxikologische Labortests zur prognostischen Bewertung einer Umweltchemikalie genutzt werden? Die Beantwortung solcher Fragen ist auch eine Voraussetzung zur Prognose von Ökosystem-Beeinträchtigungen, zumal Wirkungsstudien an komplexen Ökosystemen auf viele praktische und konzeptionelle Probleme stoßen (vgl. KRATZ & WEIGMANN 1985, SCHLOSSER 1988, MATHES & WEIDEMANN 1991).

2. Konzeption des Modells

Es soll ein konzeptionelles Modell (sensu WISSEL 1989) vorgestellt werden, das laborstandardisierte Populationsverläufe von Bodentieren (am Beispiel *Folsomia candida*) und Chemikalienwirkungen auf sie auf die Freilandsituation mit natürlichen, abiotischen und biotischen, populationswirksamen Parametern überträgt. Es wird kein Gesamtmodell des Populationsverlaufs angestrebt, sondern ein realistisch normierter Verlauf eines altersgleichen Teilkollektivs der Population, wie es in ökotoxikologischen Labortests verwendet wird. Das Modell wird also an die experimentellen Gegebenheiten einer "Testpopulation" angepaßt. Schwerpunkte der Betrachtung sind die Bedeutungen von chemisch bedingten Nachkommenseinbußen und Populationsmortalitäten bis zur Geschlechtsreife, die zu den natürlich bedingten hinzukommen. Da Collembolen viele räuberische Antagonisten haben, sind ihre Freiland-Populationen trotz hoher Fortpflanzungsraten (GREEN 1964, SNIDER 1972, SEIFERT & al. 1979) durch hohe natürliche Mortalität charakterisiert.

1. Das Rechenmodell geht von einer maximalen Nachkommenzahl aus, d. h. von einem Anfangsbestand N_0 gleich der Kapazität K der Umwelt. Der Populationsverlauf wird in 10 Zeittakte bis zur Fortpflanzungsfähigkeit der altersgleichen Population aufgeteilt, denen eine mittlere anzunehmende prozentuale Mortalität (Verminderungsfaktor v) zugeordnet wird. Diese beinhaltet summarisch alle abiotischen und biotischen Mortalitätsfaktoren. Bei konstant angenommenem v für jeweils eine Generation ergibt sich eine konstante Gesamtmortalität M vom Schlupf der Collembolen aus dem Ei (Zeit $t = 0$) bis zur Fortpflanzung (Zeit $t = 10$). Die Populationsgröße N_t zu jedem Zeittakt t errechnet sich aus der des vorhergehenden Zeittakts ($t-1$).

Die allgemeine Gleichung der Populationsabnahme lautet:

$$(1) \quad N_t = N_0 v^t$$

N_0 ist die Anzahl zur Zeit $t = 0$. v ist der Verminderungsfaktor pro Zeittakt (t_1 bis t_{10}) bei "natürlicher Umwelt". M ist die Gesamtmortalität bis $t = 10$ und ergibt die Anzahl fortpflanzungsreifer Tiere N_{10} in % von N_0 . Die Elternpopulation wird im folgenden Zeitabschnitt als nicht mehr vorhanden angenommen (entsprechend dem Laborverfahren).

Beispielweise errechnet sich die Anzahl zur Zeit $t = 10$ aus

$$N_{10} = N_0 v^{10} \text{ (Rechenbeispiel: } N_{10} = 100 \cdot 0.80^{10} = 10.7; M = 89.3\% \text{: Abb. 1, erste Generation).}$$

2. Bei einer Chemikalienwirkung auf die postnatale Mortalität ergibt sich effektiv - als Summe der Wirkung aller natürlicher Faktoren und der Chemikalie - eine höhere Sterberate pro Zeittakt (v'), die dann in die Formel (1) statt v eingesetzt wird.

Effektiver Verminderungsfaktor:

$$(2) \quad v' = v m$$

Dabei ist m der zusätzlich durch die Chemikalie bedingte Verminderungsfaktor pro Zeittakt, wie er sich aus den Laborversuchen (ohne die natürliche Sterblichkeit) ergibt. In der Regel wird im Labor die Gesamt-Mortalität M nach 2 oder 3 Wochen ermittelt (RIEPERT 1989), aus der m errechnet werden kann.

3. Als allgemein anerkannte ökologische Gesetzmäßigkeit wird angenommen, daß bei Vermehrung einer Population über die Kapazitätsgrenze K hinaus ein dichteabhängiger, intraspezifischer Konkurrenzfaktor die Mortalität dynamisch erhöht. In Analogie zum Bremsfaktor logistischer Wachstumskurven (vgl. WISSEL 1989) wird ein weiterer dynamischer Verminderungsfaktor eingeführt, der oberhalb des Schwellenwertes K für die Populationsgröße N wirksam wird. In die Formel (1) wird dann v'' statt v eingesetzt (vgl. Abb. 1: 2. Generation).

Effektiver Verminderungsfaktor bei Kapazitätsüberschreitung:

$$(3) \quad v'' = v' \cdot v' \left(1 - \frac{K}{N_{t-1}} \right) \quad (\text{bei } N > K = 100)$$

4. Die Reproduktionsrate r wird modellhaft auf eine kurze erste Reproduktionszeit der altersstandardisierten Elterngeneration ($g-1$) bezogen, in der eine hinreichend altersstandardisierte Tochtergeneration (g) erzeugt wird; sie ist also nicht die gesamte Reproduktionsrate über die Lebensdauer der Elterngeneration. Auch wird die umweltbedingte pränatale Sterblichkeit während der Ei- und Embryonalphase einbezogen, so daß sich aus r und N_{10} die Anzahl frischgeschlüpfter Nachkommen errechnet. Die *effektive Reproduktionsrate* (r_{em}) ergibt sich bei zusätzlich chemikalienbedingten Nachkommensverlusten (em : Ei- und Embryonal-Mortalitätsrate). Die Nachkommenzahl errechnet sich:

$$(4) \quad N_{0,g} = (r_{em}) N_{10,g-1}$$

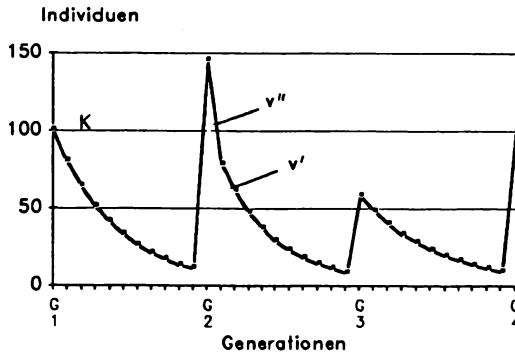


Abb. 1: Muster eines Populationslaufs. Bei Überschreitung der Kapazität K wirkt ein erhöhter Verminderungsfaktor v'' statt v' .

5. Populationswirksame Umweltparameter schwanken voraussagbar innerhalb bestimmter Wahrscheinlichkeitsgrenzen. Infolgedessen fluktuieren mit ihnen auch die natürlichen effektiven Reproduktionsraten r sowie Verminderungsraten v im Sinne des Modells. Für eine Populationsprognose ist es sinnvoll und realistisch, diese Faktoren zufällig innerhalb von Grenzbereichen schwanken zu lassen.

Für die Verminderungsrates v wurden Zufallszahlen zwischen $v=0.75$ und $v=0.85$ benutzt, die innerhalb einer Generation als konstant angenommen wurden. Für die natürlichen Reproduktionsraten wurden Zufallszahlen zwischen $r=10.0$ und $r=13.0$ angenommen. Dadurch werden veränderliche Klima- und Feinddruck-Effekte simuliert.

10 Modellprobeläufe mit jeweils anderen Zufallszahlen ergaben "unendlich" laufende Populationen mit Fluktuationen der Nachkommenszahlen (etwa zwischen 50 und 250% der Kapazität: vgl. Abb. 2a), die empirischen Populationsbefunden aus Freilandstudien über Collembolen entsprechen (vgl. WEIGMANN 1973, TAKEDA 1983, KAMPMANN & FUNKE 1987). Damit erweisen sich die gewählten Zufallszahlen als modellhaft realistisch. Unter pessimalen Modellbedingungen sollte eine Population nach 3 Generationen noch über 1% des Anfangsbestandes liegen.

6. Eine letzte Modellprämisse ist das Aussterben einer Population, die unter 1% der Kapazität fällt ($N_{10} < 1 \rightarrow 0$ bei $K=100$). Die Aussterbewahrscheinlichkeit in Generationszahlen dient als Bewertung der Chemikalienwirkung; sie wird als arithmetisches Mittel aus 10 Populationsdurchläufen mit unterschiedlichen Zufallszahlen von r und v errechnet. Dabei sind die aus Labortests ermittelten Chemikalienwirkungen bezüglich *Nachkommenseinbußen (em)* und *Mortalitäten bis zur Geschlechtsreife M* einzusetzen.

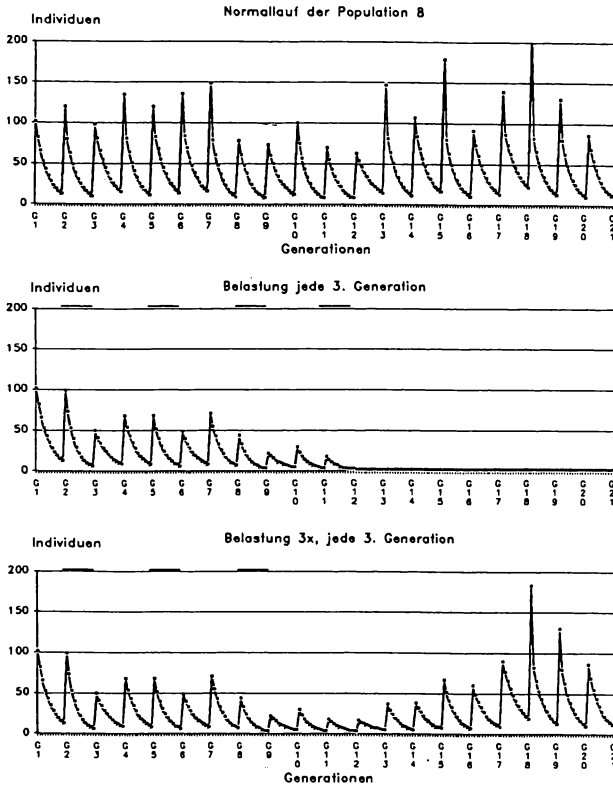


Abb. 2: 2a, oben: Fluktuation einer simulierten unbelasteten Freilandpopulation; 2b, Mitte: Subtoxische Belastung jeder 3. Generation (Balkensymbol oben) bis zum Aussterben, 2c, unten: 3-malige subtoxische Belastung wie in 2b und dann Wiedererholung.

3. Anwendungsbeispiele

Abb. 2a zeigt einen simulierten Populationsverlauf bis zur 21. Generation ohne chemische Belastung. Die N_{10} -Bestände liegen grob zwischen 50 und 250% der Ausgangspopulation, die Minima und Maxima der N_{10} -Bestände zwischen 5 und 25. Überschießende Populationen (über $K = 100$) werden innerhalb eines Zeittaktes unter die Kapazitätsschwelle gedrückt. Dadurch kann sich das Modell nicht aufschaukeln.

In Abb. 2b wird die Wirkung einer Chemikalienapplikation simuliert mit einer angenommenen Tiermortalität $M = 55\%$ und einer Nachkommenseinbuße von $em = 6\%$, die jede 3. Generation trifft. Dies könnte bei dem Acker-Collembolen *F. candida* mit 3 möglichen Generationenfolgen pro Jahr eine kurzfristig wirkende, einmalige Applikation pro Jahr simulieren. Im ersten und zweiten Jahr ließe sich keine gesicherte Aussage über den Effekt machen, die üblichen Freilandzählungen aus geringen Probenumfängen vorausgesetzt. Im 4. Jahr (11. Generation) stirbt die Population jedoch aus! Unterläßt man die 4. Applikation, so benötigt die Population 10 Generationen, um die Kapazitätsschwelle wieder zu erreichen (Abb. 2c).

Dauerbelastungen wurden mit abgestuften Werten für die Tiermortalität M (von 0 bis 46.1%, also unter der LC-50 je Generation) und für die Nachkommenseinbußen em (von 0 bis 90%) in jeder Kombination in je 10 Durchläufen mit unterschiedlichen Zufallszahlen für v und r simuliert. Abb. 3a und 3b zeigen zwei Beispiele. Beide Kurven ergeben ein zu erwartendes "schleichendes" Aussterben, d. h. eine Kurzzeitstudie im Freiland würde den Populationszusammenbruch nicht belegen können.

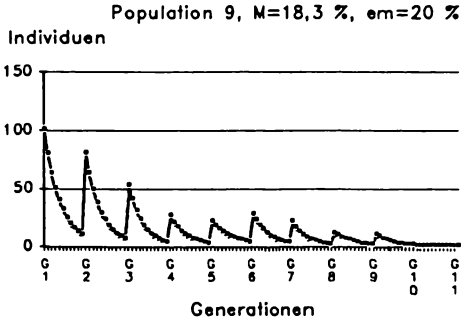
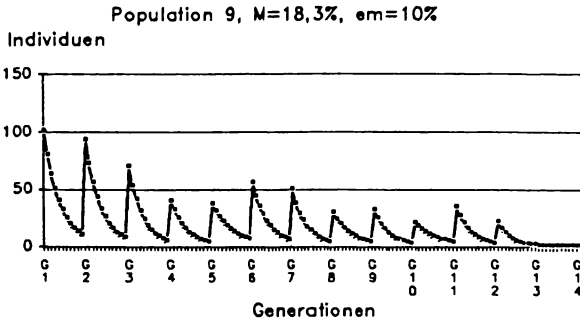


Abb. 3: Überlagerung einer simulierten Populationsdynamik mit subtoxischen Laborparametern: Mortalität bis zur Fortpflanzung jeweils 18,3%, Nachkommenseinbußen 10% (Abb. 3a, oben), bzw. 20% (Abb. 3b, unten).

Die Durchläufe für 7 Mortalitätsstufen für die geschlüpften Tiere und jeweils 10 Stufen der Nachkommensminderung (Fertilitätsrückgang der Eltern, Ei- und Embryonalmortalität zusammengefasst) ergeben Mittelwerte aus je 10 Durchläufen mit unterschiedlichen Zufallszahlen, die sich gemäß Abb. 4 in Anpassungskurven darstellen lassen, bei geringen Anfangsmortalitäten als Potenzkurven, bei höheren als Exponentialkurven. Die resultierenden Werte sind die mittleren Überlebenswahrscheinlichkeiten in Generationszahlen. Diese Ergebnisse werden übersichtlicher in einer Matrix-Darstellung veranschaulicht (Abb. 5: jeder Punkt G bedeutet Generationsdauer im Mittel aus 10 Durchläufen), in die einige Linien gleicher Aussterbewahrscheinlichkeit eingetragen sind. Auf den Achsen sind jeweils diejenigen Daten aufgetragen, die in Laborversuchen ermittelbar sind: Nachkommen-Minderung durch eine Chemikalie im Vergleich zu einer unbehandelten Kontrolle sowie Mortalität der geschlüpften Tiere bis zu einem Zeitpunkt der Geschlechtsreife.

Summarisch wird deutlich, daß nach diesem Modell weder die Minderung der Nachkommen durch eine Chemikalie noch die Tiermortalität für sich genommen dauerhaft über 20% betragen dürfen, in Kombination noch weniger, wenn ein mittelfristiges Überleben ("mehr als 20 Generationen") im Freiland gesichert sein soll. Diese Grenzwerte können als Bewertungskriterien für Laborversuche verwendet werden, die die Umwelt- bzw. Bodentierverträglichkeit einer Chemikalie prüfen sollen.

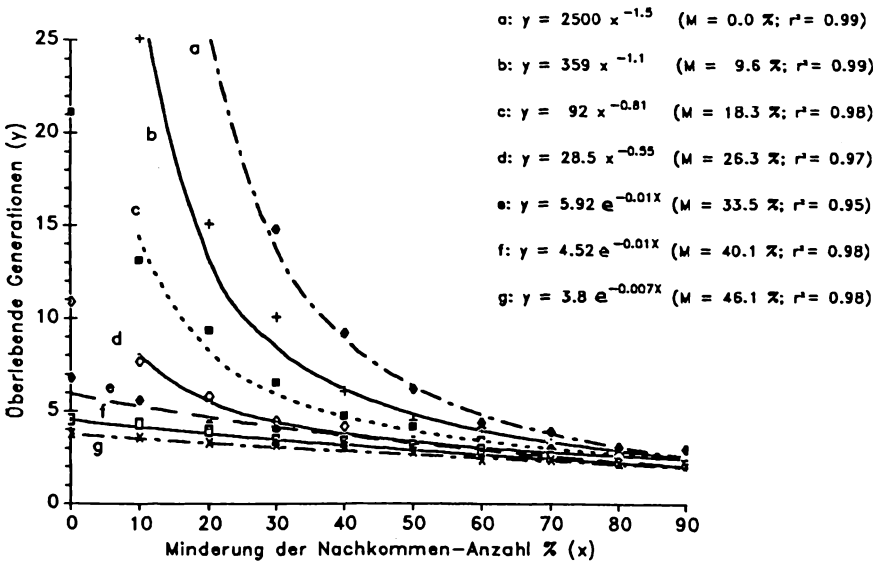


Abb. 4: Beziehungen zwischen Minderung der Nachkommenzahlen (x) bei 7 Stufen der postnatalen Mortalität (Kurve a: M = 0%, b: 9,6%, c: 18,3%, d: 26,3%, e: 33,5%, f: 40,1%, g: 46,1%) und der mittleren Überlebensdauer in Generationen (y) nach dem Modell.

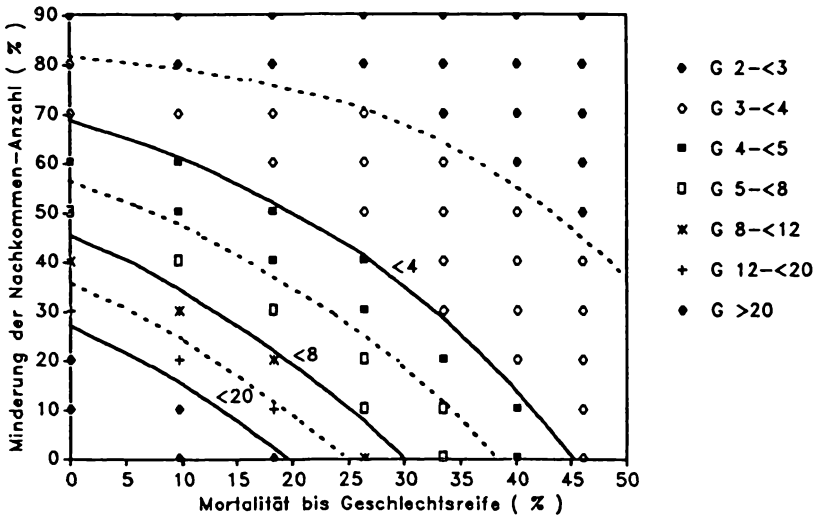


Abb. 5: Matrixdarstellung der Kombination von postnatalen und pränatalen Mortalitäten nach Laborversuchen mit "natürlichen" Populationsverläufen: jeder Punkt entspricht dem Mittel der Überlebensdauer in Generationen aus 10 zufallsmodulierten Läufen, mit Isolinien gleicher Aussterbewahrscheinlichkeit.

4. Diskussion

Das vorgestellte Simulationsmodell eignet sich zur Prognose einer Chemikalienwirkung auf Bodentiere in der Freiland-situation, wenn Labordaten zur Sterberate innerhalb einer Generation und zu den Nachkommensverlusten durch eine Chemikalienkonzentration vorliegen. Es ist kein Instrument zur Simulation einer natürlichen Population, weil gemäß den Labortest-Verfahren mit altersstandardisierten Kollektiven gearbeitet wird. Es wäre zwar möglich mit Überlappungen zeitlich versetzter Populationsanteile zu arbeiten. Dies brächte jedoch gegenüber dem zeitlich begrenzten Modellkollektiv keine anderen Erkenntnisse, da für jede Schlüpfgruppe gleiche Chemikalieneffekte vorzusetzen sind.

Für das Modell wären präzisere Kenntnisse der Populationsdaten im Freiland wünschenswert. Es erscheint jedoch nahezu aussichtslos, gesicherte Wachstums- und Sterberaten für altersgleiche Teilkollektive aus Freilandbefunden (z. B. SCHLEUTER 1984) herzuleiten, wie für das Laborpopulationmodell notwendig. Deshalb mußte ein Modell gefunden werden, daß allgemeine populationsökologische Grundvoraussetzungen - wie realistische Vermehrungs- und Sterberaten, dynamische intraspezifische Konkurrenzeffekte bei Kapazitätsüberschreitung, Aussterben einer Population bei Unterschreiten eines Minimalbestandes (Modellannahmen) - mit den Spezifika einer altersgleichen Teilpopulation (empirische Labordaten) entsprechend dem Laborstandard (RIEPERT 1989) verbindet. Die zufallsgenerierten, in der Natur schwankenden Populationsparameter, wie "natürliche" Mortalität der Entwicklungsstadien, simulieren die wechselhaften Klima- und Feinddruck-Effekte pauschal. Da diese Parameter nicht exakt prognostizierbar sind, müssen für die Prognose der Überlebensdauer bei natürlichen und zusätzlichen chemikalienbedingten Verlusten aufeinander abgestimmte Parameter verwendet werden. Die Evaluation des Modells ergibt sich daraus, daß Fluktuationen und natürliche Stabilität entsprechend empirischer Freilandbefunde erreicht werden.

Das Modell erlaubt Dynamisierung der Chemikalienwirkung, wie Wirkungsabnahme nach ökologischen Halbwertzeiten, abwechselnde, zeitlich begrenzte oder additive Wirkungen von Chemikalien. Es können bei geringem Mehraufwand an Programmierung langlebige, Überlappende Populationen oder Mehrfachvermehrung einer Elterngeneration simuliert werden.

Literatur

- CHEMG 1980: Chemikaliengesetz. - Bonn 1980 (Novelle 1990).
- GREEN, C. D., 1964: The life history and fecundity of *Folsomia candida* (Willem) var. *distincta* (Bagnall) (Collembola: Isotomidae). - Proc. R. ent. Soc. Lond. (A) 39: 125-128.
- JANCKE, G., 1989: Modellversuche zur subakuten und subletalen Wirkung von Herbiziden auf Collembolen im Hinblick auf ein Testsystem für Umweltchemikalien. - Zool. Beitr. (N. F.) 32: 261-299.
- KAMPMANN, Th. & W. FUNKE, 1987: Epigäische Collembolen mitteleuropäischer Wälder. - Verh. Ges. Ökol. 15, (Graz 1985): 341-350.
- KRATZ, W. & G. WEIGMANN, 1985: Die Nutzung eines städtischen Ruderalökosystems für die Prüfung von Umweltchemikalien. - Mitt. Deut. Bodenkdl. Ges. 43: 587-592.
- MATHES, K. & G. WEIDEMANN, 1991: Indikatoren für Ökosystembelastung. - Berichte aus der Ökologischen Forschung Bd. 2. KFA Jülich: 126 S.
- PfLSCHG 1968: Gesetz zum Schutz der Kulturpflanzen (Pflanzenschutzgesetz). - Bonn 1968 (Novelle 1986)
- RIEPERT, F., 1989: Richtlinie zur ökotoxikologischen Prüfung von Chemikalien an Collembolen. Verfahrensvorschlag einer Arbeitsgruppe. - Biolog. Bundesanst. Berlin, Manuskript: 11 S.
- SCHLEUTER, M., 1984: Untersuchung der Collembolenfauna verschiedener Waldstandorte des Naturparks Kottenforst-Ville. - Diss. Bonn, 141 S.
- SCHLOSSER, H. J., 1988: Auswertung ökotoxikologischer Forschungen zur Belastung von Ökosystemen durch Chemikalien. - BMFT-Projekt 03 7393 4: 247 S.
- SEIFERT, R. P., AKPAN, M. E., JACKSON, E. R., KAZIM, M., LITOW, L. S., STARR, A. R. & P. J. WEINSTEIN, 1979: The intrinsic rate of natural increase of *Folsomia candida* (Willem) (Collembola: Isotomidae). - J. Kansas Ent. Soc. 52: 578-582.
- SNIDER, R., 1972: Laboratory observations on the biology of *Folsomia candida* (Willem) (Collembola: Isotomidae). - Rev. Ecol. Biol. Sol 10: 103-124.
- TAKEDA, H., 1983: A long term study of life cycles and population dynamics of *Tullbergia yosii* and *Onychiurus decemsetosus* (Collembola) in a pine forest soil. - Pedobiol. 25: 175-185.
- WEIGMANN, G., 1973: Zur Phänologie von Collembolen im Einflußbereich des Meeres. - Faun. Ökol. Mitt. 4: 185-196.

WISSEL, C., 1989: Theoretische Ökologie. - Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg. 299 S.

WOHLGEMUTH, D., 1989: Einfluß von Bodenparametern auf die Cadmiumtoxizität, ermittelt durch die Reproduktionsrate von Collembolen (*Folsomia candida*). - Dipl. FB Biol., FU Berlin. 106 S.

Adresse

Prof. Dr. Gerd Weigmann
Inst. für Zoologie, AG Bodenzologie und Ökologie
Freie Universität Berlin
Tietzenweg 85-87

D - 1000 Berlin 45

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: [Verhandlungen der Gesellschaft für Ökologie](#)

Jahr/Year: 1992

Band/Volume: [21_1992](#)

Autor(en)/Author(s): Weigmann Gerd

Artikel/Article: [Ein Modell zur Übertragung ökotoxikologischer Labordaten über Bodentiere auf Freilandpopulationen 113-120](#)