

UMWELTVERHALTEN VON CHEMIKALIEN IN EINEM TERRESTRISCHEN ÖKOSYSTEMAUSSCHNITT: EFFEKTE AUF MIKROBIELLE BODENATMUNG

Bernhard Förster, Anke Marcinkowski, Hans Schallnaß, Thomas Knacker

ABSTRACT

The effects of Lindane (γ -HCH) and Na-Pentachlorophenol (PCP) at two concentration levels on soil bacterial and fungal biomass in a terrestrial microcosm were determined by the substrate-induced-respiration method. Before substance application, average microbial biomass was 55.9 mg/100 g soil. The average ratio of bacterial to fungal respiration was about 1:4. Both chemicals depressed the microbial biomass significantly three days after application. This effect was no longer detectable at the end of the 12 weeks test period.

keywords: *soil respiration, microcosm, microbial CO₂-production, SIR, PCP, Lindane*

EINLEITUNG

Mikroorganismen stellen mit einer Biomasse zwischen 80 und 90 % der Gesamtbiomasse im Boden und ihrer Bedeutung für den Abbau organischen Materials einen entscheidenden strukturellen und funktionellen Parameter im Teilökosystem Boden dar. Die steigende Kontamination des Bodens mit toxischen Stoffen, z.B. durch die zunehmende Anwendung von Agrochemikalien (ANDERSON et al. 1981) birgt die Gefahr, daß das Teilökosystem Boden verändert und langfristig beeinträchtigt wird.

Zur prospektiven Beurteilung der Wirkung von Umweltchemikalien auf ökologische Systeme werden entweder Labor- oder Freilandversuche unternommen. Eine vermittelnde Stellung nehmen Modell-Ökosysteme ein, anhand derer ein komplexes biologisches System unter standardisierten Rahmenbedingungen untersucht werden kann.

Anhand von terrestrischen Ökosystemausschnitten (Modellökosysteme, vgl. KNACKER et al. 1991) wurde die Wirkung von Pentachlorphenol und Lindan auf die Boden-Mikroflora eines Wiesenbodens untersucht.

MATERIAL UND METHODEN

Mikrokosmen

Die terrestrischen Ökosystemausschnitte (Mikrokosmen) bestehen aus 60 cm tiefen Bodenzylindern mit einem Durchmesser von 18 cm und sind von einer Röhre aus hochpolymerem, inertem Kunststoff ummantelt. Sie wurden ohne Beeinträchtigung des natürlichen Bodenprofils und unter Beibehaltung der vorhandenen Vegetation mittels eines speziellen Probennehmers gewonnen und im Gewächshaus unter kontrollierten Temperatur- und Feuchtebedingungen gelagert.

Boden

Die Mikrokosmen wurden von einer nördlich von Frankfurt gelegenen, mit Obstbäumen bestandenen Tal-Glatthaferwiese (*Arrhenatheretum elatioris* Assoziation) entnommen. Der Bodentyp ist eine Parabraunerde aus Lößlehm. Tabelle 1 zeigt einige Bodeneigenschaften (ausführlichere Angaben zu Vegetation, Boden und Klima des Standortes in FÖRSTER 1989). Die mikrobielle Biomasse in den oberen 20 cm Boden (A_p -Horizont) wurde vor Applikation der Prüfsubstanzen sowie 3 und 84 d nach Applikation der Prüfsubstanzen auf die Mikrokosmen bestimmt. Alle Bodenproben wurden feldfrisch gesiebt (2 mm), in Gefrierbeutel verpackt (Material: Polaren, Fa. Melitta, D-4950 Minden), und bei 4 - 6 °C bis zu ihrer Verwendung gelagert. Zusätzlich wurde die Kurzzeitwirkung der Prüfsubstanzen auf die Glukose-induzierte Bodenatmung nach Beaufschlagung isolierter Bodenproben im Labor untersucht. Dazu wurde eine 2 cm hohe Schicht gesiebten Bodens in Petrischalen mit den Prüfsubstanzen beaufschlagt und die Glukose-induzierte Bodenatmung nach 3 und 6 d über einen Zeitraum von 22 h gemessen. Die Bestimmung der mikrobiellen Biomasse geschah nach der Methode von ANDERSON und DOMSCH (1978). Die Methode beruht auf der empirischen Beziehung zwischen der Glukose-induzierten, maximalen Initialatmung der Boden-Mikroorganismen und der aktuellen mikrobiellen Biomasse des Bodens. Danach produzieren 40 mg mikrobiell gebundenen Kohlenstoffs (BioC) bei einer Temperatur von $22 \pm 0,5$ °C in einer Stunde 1 ml CO_2 . Zur Differenzierung der Boden-Mikroflora in Bakterien und Pilze wurde die Methode der selektiven Hemmung von ANDERSON und DOMSCH (1973) angewendet. Die Messung der Bodenatmung wurde mit einem vom Batelle-Institut e.V. Frankfurt entwickelten Bodenatmungsmeßgerät vorgenommen, bei dem das CO_2 im konstanten Luftstrom gemessen wird (SCHÖNBORN und DUMPERT 1986).

Tab. 1: Kenndaten des Bodens (A_p -Horizont)

pH (0, In KCl)	5,78
Organische Substanz (%)	2,39
Kohlenstoff (%)	1,39
N (gesamt) (%)	0,15
C/N Verhältnis	9,00

Prüfsubstanzen

Als Prüfsubstanzen wurde Lindan (Nexit stark, γ -HCH 89 %, Celamerk GmbH, D-6507 Ingelheim) und Na-Pentachlorphenol (PCP, Fluka AG, CH-9470 Buchs) in je zwei Konzentrationen eingesetzt (Tabelle 2). Die Substanzen wurden als wässrige Lösung auf je 8 Mikrokosmen appliziert. 16 Mikrokosmen blieben als Kontrollen unbehandelt.

Tab. 2: Applikationsmengen der Prüfsubstanzen

Substanz	Applikations- menge der Prüf- substanzen [mg/m ²]	Wirkstoffgehalt	
		Mikrokosmos [mg]	Laborprobe [ppm]
Lindan N	50	0,856	5,0
Lindan H	250	4,280	26,8
PCP N	1000	19,770	107,0
PCP H	5000	98,740	535,0

ERGEBNISSE

Die Konzentration des mikrobiell gebundenen Kohlenstoffs (BioC) in den oberen 20 cm des Bodens vor Applikation der Prüfsubstanzen betrug durchschnittlich $55,9 \pm 3,5$ mg/100 g Boden. Das Verhältnis von Pilzen zu Bakterien war etwa 4 : 1.

3 Tage nach Applikation der Prüfsubstanzen auf gesiebte Bodenproben im Labor zeigte sich im Vergleich zur Kontrolle bei PCP eine konzentrationsabhängige, signifikante Erniedrigung des BioC-Gehaltes sowie ein veränderter Verlauf der Glukose-induzierten Bodenatmung mit einem Maximalwert, der bei PCP N 114 %, bei PCP H 170 % gegenüber der Kontrolle betrug (Abb. 1).

Bodenatmung (Labortest)

3 Tage nach Applikation von Lindan/PCP

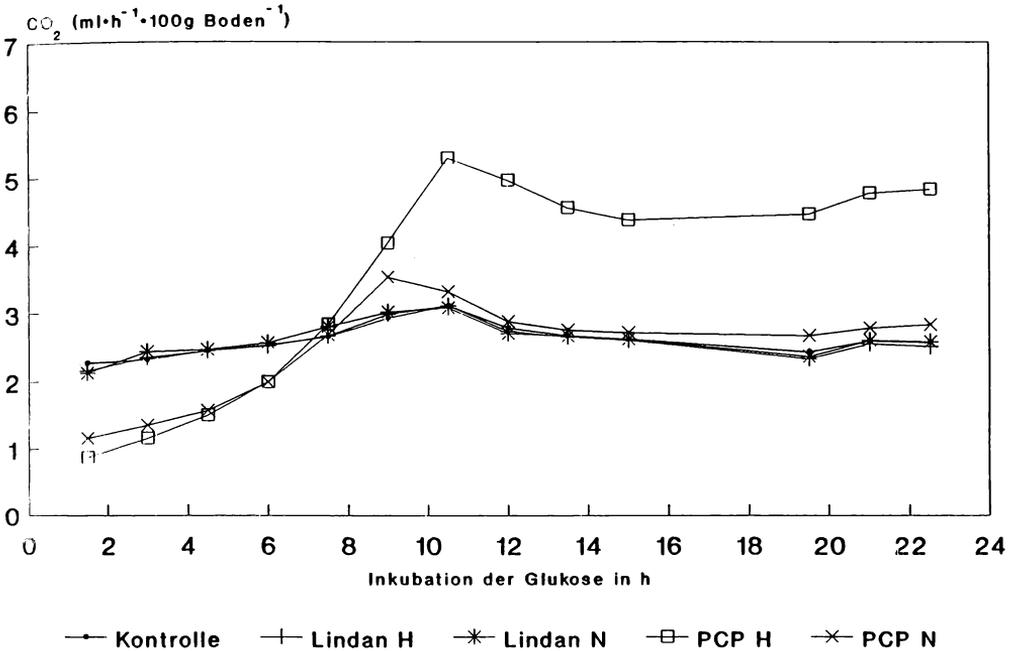


Abb. 1: Glukose-induzierte Bodenatmung 3 Tage nach Applikation der Prüfsubstanzen auf gesiebtes Bodenmaterial im Labor

Die Applikation von Lindan ergab keine Änderung des BioC-Gehalts oder der Bodenatmung. 3 Tage nach Beaufschlagung der Mikokosmen mit den Prüfsubstanzen war im Vergleich zur Kontrolle der Gehalt an BioC in den oberen 5 cm des Bodens bei Lindan H, PCP N und PCP H reduziert (Tabelle 3), der Verlauf der Bodenatmung bei PCP H leicht gesteigert (Abb. 2). Am Ende der Versuchsphase, 84 Tage nach Applikation der Prüfsubstanzen auf die Mikrokosmen, waren keine signifikant unterschiedlichen BioC-Konzentrationen im Boden der vier Belastungsvarianten gegenüber der Kontrolle feststellbar (Tabelle 3). Das Verhältnis von Pilzen zu Bakterien betrug etwa 4 : 1.

Tab. 3: Relative BioC-Gehalte des Bodens 3 und 84 Tage nach Applikation der Prüfsubstanzen im Vergleich zur Kontrolle

Belastung	Laborversuch 3 d [%]	Mikrokosmos 3 d [%]	Mikrokosmos 84 d [%]
Lindan N	93,6	94,0	106,3
Lindan H	95,1	45,3 *	90,8
PCP N	51,5 *	53,8 *	105,7
PCP H	38,6 *	66,6	97,1

* Signifikant gegenüber der Kontrolle

Bodenatmung (Mikrokosmos)

3 Tage nach Applikation von Lindan/PCP

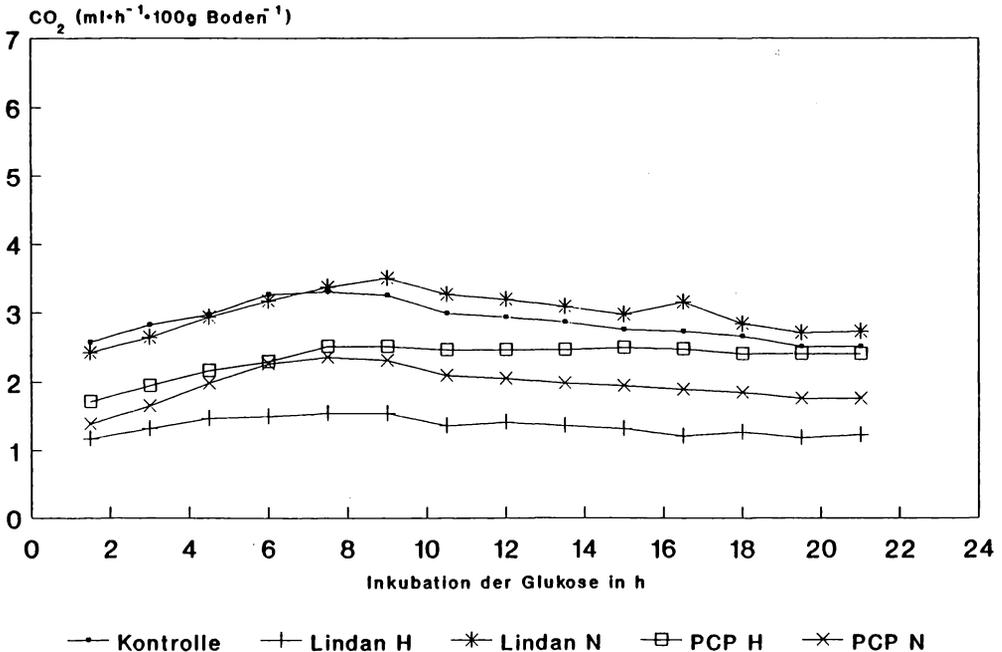


Abb. 2: Glukose-induzierte Bodenatmung der Bodenproben aus den Mikrokosmen, die 3 Tage zuvor mit den Prüfsubstanzen beaufschlagt worden waren

DISKUSSION

Für die Wirkungen der verwendeten Substanzen ist wichtig, wie gut die Wirkstoffe die Boden-Mikroorganismen erreichen. Dies hängt u.a. von der applizierten Dosis, der Löslichkeit und Mobilität, den Sorptionseigenschaften und der Persistenz der Chemikalie im Boden ab. Offenbar spielt der Humusgehalt dabei eine wichtige Rolle, denn humusreiche Böden sind hinsichtlich ihrer ökologischen Stabilität oft weniger störanfällig für Pestizide (MALKOMES 1987, ZELLES et al. 1986).

Zur Wirkung von Pentachlorphenol auf die Boden-Mikroorganismen

Nach CROSBY et al. (1981) wird PCP von den meisten Mikroorganismen rasch metabolisiert, die Halbwertszeiten für PCP liegen je nach Gehalt des Bodens an organischem Kohlenstoff zwischen 2 und 4 Wochen. Auch BECK et al. (1988) geben eine Halbwertszeit des Abbaus von Pentachlorphenol mit circa 4 Wochen an, sie beobachten jedoch eine Verzögerung des PCP-Abbaus nach regelmäßiger Applikation der Chemikalie im 8-wöchigen Rhythmus und folgern daraus, daß sich der Abbau von PCP drastisch verlangsamt, wenn eine bestimmte Konzentration überschritten wird. SUZUKI (1983) gibt eine Halbwertszeit von 7 bis 14 Tagen an, bei Applikation von 100 ppm PCP. Viele Mikroorganismen nutzen PCP als C-Quelle (z.B. *Pseudomonas sp.*), oder bauen PCP zu weniger toxischen, dechlorierten und conjugierten Metaboliten ab (ENGELHARDT et al. 1986). Die Fähigkeit mancher Bakterien, PCP abzubauen, wird auch von anderen Autoren beschrieben (SUZUKI 1983, KAUFMANN 1978, REINER et al. 1987). SATO (1987, 1987a) unterscheidet die Wirkung auf Gram-positive Bakterien, wo eine PCP-Konzentration von 10 ppm zur Einstellung des Wachstums führt, von der Wirkung auf Gram-negative Bakterien, die bei der gleichen Konzentration unbeeinträchtigt bleiben. Die hier verwendeten Applikationsmengen von PCP lassen eine Wirkung auf die Boden-Mikroflora erwarten, da die Mikroorganismen bereits ab einer Konzentration von > 2 ppm beeinträchtigt werden (KORTE 1987). Da es sich bei PCP um ein Fungizid handelt, ist besonders mit einer Wirkung auf die Bodenpilze zu rechnen. Wie sich nach Applikation von PCP auf isoliertes Bodenmaterial im Labor zeigt, wird die Bodenatmung der Mikroorganismen durch PCP deutlich verändert. BECK et al. (1988) fanden die Bodenatmung in einem Moderbuchenwald 8 Wochen nach Applikation von PCP gesteigert. Mit einem Gehalt an organischem Kohlenstoff zwischen 1,24 und 1,44 % im A_p-Horizont und einer mikrobiellen Biomasse zwischen 50 und 90 mg BioC/100 g Boden kann bei der applizierten Menge von 1 bzw. 5 g PCP/m² mit einem relativ raschen Abbau des PCP gerechnet werden, sofern die Chemikalie nicht schnell in tiefere Bodenschichten wandert, wo der mikrobielle Besatz drastisch verringert ist. Eine solche Verlagerung des PCP findet nach EBING et al. (1986) nicht statt. Nach einer Inkubationszeit von 12 Wochen kann daher ein weitgehender Abbau des PCP erwartet werden. Aufgrund der enormen Populationsdynamik der Mikroorganismen ist es wahrscheinlich, daß eine kurz nach Applikation auftretende Depression der mikrobiellen Biomasse, wie sie sich bei der Laboruntersuchung zeigt und auch bei der Mikrokosmos Untersuchung drei Tage nach Beaufschlagung andeutet, bald durch eine Zunahme PCP-toleranter Organismen ausgeglichen wird. So fand WALTON et al. (1989) die anfängliche Depression der Bodenatmung nach Applikation einer Chemikalie meist schon nach 6 Tagen aufgehoben. Ein durch PCP verursachter Selektionsvorgang, d.h. eine mögliche qualitative Veränderung des mikrobiellen Artenspektrums, wie es z.B. SATO (1985) für die Bakterien beschreibt, ist mit der Methode von ANDERSON und DOMSCH (1978) nicht überprüfbar. Die Ermittlung der mikrobiellen Biomasse allein gibt daher keinen Hinweis auf die Gefahr, die sich aus einer durch die Chemikalie verursachte, mögliche Beeinträchtigung der Artenvielfalt für das System Boden ergibt.

Zur Wirkung von Lindan auf die Boden-Mikroorganismen

Nach KARG (1965) wird Lindan nicht mikrobiell abgebaut. Allerdings beschreiben BEATTY und SOHN (1986) zwei Bodenpilze, die bei einer Konzentration vom 1 ppm Lindan im Wachstum angeregt werden, weil sie fähig sind, das Insektizid zu metabolisieren. 6 ppm Lindan wirkte jedoch für alle 5 von ihnen untersuchten Bodenpilze toxisch. Ein Grund für die reduzierte mikrobielle Biomasse in den Mikrokosmen 3 Tage nach Beaufschlagung könnte die fungizide Wirkung der hohen Lindandosis sein. Ein besonders intensiver mikrobieller Abbau

soll unter anaeroben Bedingungen auftreten, z.B. in überfluteten Böden (DFG 1982). Ferner verdunstet Lindan leicht, besonders bei feuchten Böden (DFG 1982). Die Halbwertszeit von Lindan im Boden schwankt zwischen 15 Wochen und einem Jahr (DFG 1982). 12 Wochen nach Applikation von Lindan auf die Ökosystemausschnitte war keine quantitative, von der Chemikalie verursachte Beeinträchtigung der pilzlichen und bakteriellen Organismen feststellbar. Auch hier kann angenommen werden, daß eine 12-wöchige Versuchsdauer für eine Anpassung der Boden-Mikroflora an die veränderten Bedingungen möglicherweise ausreicht. Nach SCHUBERT (1985) wurden Bakterien in der ersten Woche nach Lindan-Anwendung reduziert, ihre Zahl nahm aber in der zweiten Woche nach Anwendung wieder zu. Die Mikrokosmen wurden für die aktive Sickerwassergewinnung mit z.T. großen Wassermengen beregnet (vgl. VINCENA et al. 1991). Infolgedessen war der Boden stets feucht, was die Verdunstung von Lindan fördert, bis wassergesättigt, was zu zeitweise anaeroben Bedingungen geführt haben kann, wodurch der mikrobielle Abbau von Lindan begünstigt wird. Die verwendeten Mikrokosmen zur Untersuchung der Prüfchemikalien-Wirkung auf das komplexe System Boden erwiesen sich als praktikabler Weg zur Eliminierung klimatischer Stressoren (starke Temperatur- und Feuchteschwankungen) und zur besseren Standardisierung der Untersuchungsobjekte. Die hier gewonnenen Daten geben Hinweise auf mögliche Wirkungen der Prüfchemikalien im Freiland. Zur Validierung der Übertragbarkeit der Ergebnisse sind jedoch eigene ausführliche Untersuchungen notwendig, bei der die Vergleichbarkeit der Mikrokosmen mit dem Freiland zu prüfen ist. Eine Untersuchung dazu findet derzeit beim Batelle-Institut e.V. Frankfurt statt.

ZUSAMMENFASSUNG

Die Wirkung einer einmaligen Applikation des Insektizids Lindan sowie des Fungizids Natrium-Pentachlorphenol in je zwei unterschiedlichen Konzentrationen auf den Gehalt an mikrobieller Biomasse im Boden terrestrischer Ökosystemausschnitte (Mikrokosmen) von 18 cm Durchmesser und 60 cm Länge wurde untersucht. Die applizierte Menge betrug 50 bzw. 250 mg/m² (Lindan) und 1 bzw. 5 g/m² (PCP). Der mittlere Gehalt an mikrobiell gebundenem Kohlenstoff (BioC) in den oberen 20 cm des Bodens vor Applikation betrug 55,9 mg/100 g Boden. Das Verhältnis von Pilzen zu Bakterien war 4 : 1.

3 Tage nach Applikation der Chemikalien auf die Ökosystemausschnitte zeigte sich im Vergleich zur Kontrolle eine Depression der mikrobiellen Biomasse von ca. 55 % bei der hohen Lindankonzentration, 46 % bei der niedrigen PCP- und 33 % bei der hohen PCP-Konzentration. Eine chemikalienabhängige Veränderung war 12 Wochen nach Beaufschlagung weder für die mikrobielle Biomasse noch für das Verhältnis von Pilzen und Bakterien nachzuweisen. Die Applikation vom PCP auf gesiebte Bodenproben im Labor führte im Vergleich zur Kontrolle zu einer signifikanten Depression der mikrobiellen Biomasse von 61,4 % bei der hohen und 48,5 % bei der niedrigen Konzentration und zu einem veränderten Verlauf der Glukose-induzierten Bodenatmung. Die Zugabe von Lindan führte bei diesem Versuch im Vergleich zur Kontrolle zu keiner Veränderung der mikrobiellen Biomasse oder Bodenatmung.

Für die finanzielle Unterstützung danken wir dem Umweltbundesamt (UBA) Berlin.

LITERATUR

- ANDERSON J.P.E., ARMSTRONG R.A., SMITH S.N., 1981: Methods to evaluate pesticide damage to the biomass of the soil microflora. - *Soil Biol. Biochem.* 13: 149-153.
- ANDERSON J.P.E., DOMSCH K.H., 1978: A physiological method for the quantitative measurement of microbial biomass in soil. - *Soil Biology and Biochemistry* 10: 215-221.
- ANDERSON J.P.E., DOMSCH K.H., 1975: Measurement of bacterial and fungal contributions to respiration of selected agricultural and forest soils. - *Can. J. Microbiol.* 21: 314-322.

- ANDERSON J.P.E., DOMSCH K.H., 1973: Quantification of bacterial and fungal contributions to soil respiration. - Arch. Microbiol. 93: 113-127.
- BEATTY K.L., SOHN M.L., 1986: Effect of three insecticides on growth rates of fungi. - Bull. Environ. Contam. Toxicol. 36: 533-539.
- BECK L., DUMPERT K., FRANKE U., MITTMANN H.-W., RÖMBKE J., SCHÖNBORN W., 1988: Vergleichende ökologische Untersuchungen in einem Buchenwald nach Einwirkung von Umweltchemikalien. - In: SCHEELE, B., VERFONDERN, M., (Hrsg.): Aufwindung von Indikatoren zur prospektiven Bewertung der Belastbarkeit von Ökosystemen. - Bd. 9, Jül. Spez. 439: 548-701.
- CROSBY D.G., BEYNON K.I., GREVE P.A., KORTE F., STILL G.G., WONK J.W., 1981: IUPAC reports on pesticides (14); environmental chemistry of PCP. - Pure and Appl. Chem. 53: 1051-1080.
- DFG DEUTSCHE FORSCHUNGSGEMEINSCHAFT 1982: Hexachlorcyclohexan - Kontamination - Ursachen, Situation und Bewertung. - Kommission zur Prüfung von Rückständen in Lebensmitteln, Mitteilung IX, Harald Boldt Verlag, Boppard.
- EBING W., 1986: Residue behaviour of organic environmental chemicals on urban fallow land demonstrated with pentachlorophenol. - Gesunde Pflanzen 38: 275-285.
- ENGELHARDT G., WALLNÖFER P.R., MÜCKE W., RENNER G., 1986: Transformations of pentachlorophenol. - Toxicol. and Environmental chemistry 11: 233-252.
- FÖRSTER B., 1989: Untersuchung über die Wirkung von zwei Agrochemikalien auf die Boden-Mikroflora eines terrestrischen Modell-Ökosystems. - Diplomarbeit, Fachbereich Biologie, J. W. Goethe-Universität Frankfurt/M.
- KAUFMANN D.D. 1978: Degradation of pentachlorophenol in soil and by soil microorganisms. - In: RANGA RAO K.I., (Hrsg.): PCP, Plenum Press, New York.
- KNACKER T., MARCINKOWSKI A., SCHALLNASS H., FÖRSTER B., VINCENA R., RÖMBKE J., 1991: Umweltverhalten von Chemikalien in einem terrestrischen Ökosystemausschnitt: Experimentelle Konzeption. - Verh. Ges. f. Ökologie (Osnabrück 1989), Band XIX/III: 131-135.
- KORTE F., 1987: Lehrbuch der ökologischen Chemie - Grundlagen und Konzepte für die ökologische Beurteilung von Chemikalien. - Thieme Verlag Stuttgart.
- MALKOMES H.P., 1987: Einfluß von zwei Herbiziden auf den Kohlenstoff- und Stickstoffumsatz im Boden unter Laborbedingungen bei unterschiedlicher Stickstoffdüngung. - Zentralb. Mikrobiol. 142: 569-579.
- REINER E.A., CHU J., KIRSCH E.J., 1987: Microbial metabolism of pentachlorophenol. - In: RANGA RAO K., (Hrsg.): PCP, Plenum Press, New York.
- SATO K., KATO H., FURUSAKA C., 1987: Comparative study of soil bacteria flora as influenced by the application of a pesticide, pentachlorophenol (PCP). - Plant and Soil 100.
- SATO K., 1987a: Effect of a pesticide, pentachlorophenol (PCP) on soil microflora. III. Growth rates as an index of pesticide resistance of bacterial groups isolates from soil. - Can. J. Microbiol. 33: 819-822.
- SATO K., 1987 b: Effect of increasing pentachlorophenol PCP concentrations on bacterial population in glycine-percolated soils. - Biol. Fertil. Soils 5: 1-5.
- SATO K., 1985: Effect of a pesticide, pentachlorophenol (PCP) on soil microflora. II. Effect of PCP on bacterial flora in soil percolated with glycine or water. - J. Gen. Appl. Microbiol. 31: 197-210.
- SCHÖNBORN W., DUMPERT K., 1986: Zur Biologie eines Buchenwaldboden. 8. Die Mikroflora. - Carolina 44: 129-138.
- SCHUBERT R., 1985: Bioindikatoren in terrestrischen Ökosystemen. - Gustav Fischer Verlag Stuttgart.
- SÖMMERVILLE L., GREAVES M.P., 1987: Pesticide effects on soil microflora. - Taylor and Francis, London.
- SUZUKI T., 1983: Metabolism of pentachlorophenol (PCP) by soil microorganisms. - Bull. National Institute of Agricultural Sciences, Series C, No 38.
- VINCENA R., MARCINKOWSKI A., SCHALLNASS H., KNACKER T., 1990: Umweltverhalten von Chemikalien in einem terrestrischen Ökosystemausschnitt: Effekte auf Makronährelementgehalte. - Verh. Ges. f. Ökol. (Osnabrück 1989), Band XIX/III: 143-148.

- WALTON B.T., ANDERSON T.A., HENDRICKS M.S., TALMAGE S.S., 1989: Physico-chemical properties as predictors of organic chemical effects on soil microbial respiration. - Environmental Tox. and Chem. 8: 52-63.
- ZELLES L., SCHEUNERT I., KORTE F., 1986: Comparison of methods to test chemicals for side effects on soil microorganisms. - Ecotoxicology and Environmental Safety 12: 53-69.

ADRESSE

B. Förster
A. Marcinkowski
A. Schallnaß
H. Knacker
Batelle Institut e.V.
Am Römerhof 35
D-W-6000 Frankfurt am Main 90

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

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

Jahr/Year: 1991

Band/Volume: [19 3 1991](#)

Autor(en)/Author(s): Förster Bernhard, Marcinkowski Anke, Schallnaß Hans, Knacker Thomas

Artikel/Article: [Umweltverhalten von Chemikalien in einem terrestrischen Ökosystemausschnitt: Effekte auf mikrobielle Bodenatmung 149-156](#)