

Auswirkungen und Verteilung von Umweltchemikalien in einem Land-Ökosystem-Modell

Willy Werner, Heinz Ellenberg, Walter Stickan, Matthias Schaefer, Regine Strüve-Kusenbergl, Ahmed Khairy, Ulrich Müller-Wegener und Wolfgang Ziechmann

An investigation program was started to test effects of environmental chemicals within ecosystems. The test is performed with a model-ecosystem composed of three primary producers (*Lolium perenne*, *Ajuga reptans*, *Trifolium repens*) and *Allolobophora chlorotica* as a consumer, representing characteristic species of the *Lolium-Cynosuretum*. The experimental soil is a chernosem filled in containers. The environmental chemicals tested were hexachlorobenzene, pentachlorophenol and atrazine (6-chloro-N-ethyl-N'-(1-methylethyl)-1,3,5-triazine-2,4-diamine) applied in different doses. For testing each chemical, the plants were grown in mixture with earthworms, representing the model-ecosystem. In order to form a judgement of the atrazine effect under inter- und intra-specific plant competition conditions, the plants were also grown in monocultures and in mixture without earthworms.

The atrazine-water solution caused a decrease in CO₂-gas exchange and in fresh weight of above ground plant material of the three species grown in monoculture. Within mixed cultures the atrazine effect of decreasing plant productivity was intensified. The natality of the earthworms was decreased by addition of the three chemicals tested, but only pentachlorophenol caused an increase in the mortality of the adults. The distribution and the recovery of the applied chemicals within the model-ecosystem is presented by the hexachlorobenzene-experiment. The highest residue concentration was found in *Allolobophora* and in roots of the three plants species. However, more than 99% of the residue of hexachlorobenzene were recovered at the place of application, in the soil. This chemical seems to be very persistent, as 85.3% of the input were recovered as residue in the model-ecosystem ten weeks later after begin of the experiment

Atrazine, carbon dioxide gas exchange of plants, competition, ecotoxicology, hexachlorobenzene, model-ecosystem, mortality and natality of earthworms, pentachlorophenol, residue analysis.

1. Einführung

Unter dem Begriff Umweltchemikalien sind Substanzen zusammenzufassen, die in niedrigen Konzentrationen bei langfristiger Exposition mit schwer erkennbaren Auswirkungen beabsichtigt oder unbeabsichtigt durch menschliche Tätigkeit oder deren Folgen auf die Umwelt einwirken (DEUTSCHE FORSCHUNGSGEMEINSCHAFT 1979). Da die Menge und die weiträumige Anwendung sowie ihre Verteilungstendenz in der Umwelt auch außerhalb ihrer Anwendungsbereiche zu meßbaren Konzentrationen führen (KORTE et al. 1980), ist es notwendig, vorausschauend Bewertungsparameter einzuführen, um vermeidbare Schäden an Ökosystemen und besonders deren Biozönosen zu verhindern.

Solche Bewertungsparameter müssen unserer Ansicht nach empirisch ermittelt werden, da der Kenntnisstand über die biologische Reaktivität vieler Stoffe ungenügend ist. Da aber ca. 50 000 Verbindungen und über eine Million Zubereitungen und Mischungen zu den Umweltchemikalien gezählt werden und jedes Jahr neue hinzukommen (KORTE et al. 1980), ist es nicht möglich, diese alle im Freiland zu testen, ohne die Umwelt zusätzlich zu gefährden. Andererseits erscheint es notwendig, derartige Tests nicht nur an Einzelorganismen durchzuführen, sondern auch an möglichst der Natur entsprechenden Modell-Ökosystemen, die im Labor handzuhaben sind, um so Erkenntnisse über die Auswirkungen auf Ökosysteme und die Verteilung bzw. den Abbau der Substanzen in Ökosystemen gewinnen zu können.

Die Versuche zur Handhabung und Übertragbarkeit des hier vorgestellten Modell-Ökosystems dauern zur Zeit noch an, so daß in der vorliegenden Arbeit nur die Konzeption sowie erste Ergebnisse vorgestellt werden können, die bereits Vorteile eines solchen ökologischen Tests gegenüber Testverfahren an Einzelorganismen erkennen lassen. Die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf natürliche Bedingungen kann jedoch noch nicht mit vergleichenden Freilanduntersuchungen abgesichert werden, da diese zur Zeit noch andauern.

2: Vorstellung des Modell-Ökosystems

2.1 Bestandteile des Modell-Ökosystems

Als Standardmodell eines Landökosystems dient ein Emailgefäß von 30 x 30 cm Fläche und 30 cm Tiefe, das mit einer Löß-Schwarzerde gefüllt sowie mit Produzenten und Konsumenten besetzt ist.

Als Primärproduzenten werden Klone der drei Pflanzenarten *Lolium perenne* L., *Ajuga reptans* L. und *Trifolium repens* L. eingesetzt. Diese sind Vertreter der in der ganzen Bundesrepublik weit verbreiteten Weidelgras-Weißklee-Weiden (*Lolio-Cynosuretum*).

Da in terrestrischen Ökosystemen zwischen den meisten Pflanzenarten starke Konkurrenz herrscht, stellt sich in der Vegetationsschicht nur ein labiles, leicht störbares Massengleichgewicht ein (ELLENBERG 1978). Deshalb werden jeweils neun Individuen jeder der drei Arten in einem Konkurrenzverband angepflanzt. Dieser Verband, bei dem jede Pflanze 5 cm Abstand von ihrem verschieden- bzw. gleichartigen Konkurrenzpartner hat, soll dafür sorgen, daß die inter- und intraspezifischen Konkurrenzgleichgewichte zwischen den Pflanzen schnell erreicht werden.

Als Konsumenten werden nach dem Anwachsen der Primärproduzenten je 20 adulte Individuen des Regenwurms *Allolobophora chlorotica* SAVIGNY eingesetzt, der auch natürlicherweise in Weidenböden weit verbreitet ist. Vor dem Einsetzen der Konsumenten wird eine Streuschicht von abgestorbenem Pflanzenmaterial aus den Anzuchtbeeten der drei verwendeten Arten auf die Bodenoberfläche gebracht, um so von Versuchsbeginn an natürliche Lebens- und Ernährungsbedingungen für die Regenwürmer zu schaffen.

Bewässert wird das System durch zwei Standrohre, über die ein permanenter Grundwasserstand einreguliert werden kann. Durch kapillaren Wasseraufstieg wird das gesamte Pflanzgefäß bis zur Bodenoberfläche ständig befeuchtet.

2.2 Verwendete Umweltchemikalien und deren Applikation

Mit diesem Standardmodell wurden 1980/81 Versuche mit chlorierten Kohlenwasserstoffen in jeweils verschiedenen Dosierungen durchgeführt.

Zur Anwendung kamen die Verbindungen Hexachlorbenzol (HCB), ein Flammenschutzmittel und Saatgutmittel fungizider Wirkung, Pentachlorphenol (PCP), ein Holzschutzmittel, welchem neben fungizider und insektizider auch herbizide Wirkung zugeschrieben wird (SUZUKI, NOSE 1970, 1971; SCHUPPENER 1974) und das Herbizid Atrazin (2-Ethylamino-4-chlor-6-(2-propylamino)-1,3,5-triazin).

Die Auswahl der Umweltchemikalien richtete sich nach den Merkblättern über Referenzchemikalien der Projekträger-schaft Umweltchemikalien (KLÖPFER et al. 1979; SCHEELE 1980).

Wegen der geringen Wasserlöslichkeit von HCB ($5 \cdot 10^{-6}$ g/l) und PCP ($1.4 \cdot 10^{-2}$ g/l) und den entsprechenden Aufwandmengen in den Versuchen wurden diese Chemikalien vor dem Bepflanzen der Versuchsgefäße in den Boden eingemischt. Um eine homogene Verteilung zu erreichen, wurde die der Konzentrationsstufe entsprechende Menge HCB bzw. PCP mit einer Betonmischmaschine 30 Minuten lang unter die lufttrockene Schwarzerde gemischt und dann in die Pflanzgefäße gefüllt. Eine anschließende Analyse auf den HCB-Gehalt in vertikalen und horizontalen Profilen im Boden ergab, daß Inhomogenitäten in der Verteilung statistisch nicht nachzuweisen waren. Atrazin hingegen wurde wegen seiner besseren Wasserlöslichkeit ($3.3 - 7 \cdot 10^{-3}$ g/l) und der geringeren Aufwandmengen als wässrige Lösung auf den Pflanzenbestand appliziert, nachdem die Pflanzen einen geschlossenen Bestand und somit ein gewisses Konkurrenzgleichgewicht ausgebildet hatten.

2.3 Klimabedingungen

Um reproduzierbare Ergebnisse zu erhalten, müssen die Klimabedingungen kontrolliert und für alle beteiligten Tier- und Pflanzenarten möglichst günstig gehalten werden. Um hier eine Standardisierung möglich zu machen, sollten die Versuche in Klimaschränken durchgeführt werden.

Da die Klimaschränke damals noch nicht einsatzbereit waren, wurde der HCB-Versuch unter Freiland-Klimabedingungen ausgeführt. Hierzu wurden die Pflanzgefäße von Anfang August bis Mitte Oktober in einer Freilandversuchsanlage des Neuen Botanischen Gartens der Universität Göttingen aufgestellt, wo ein lichtdurchlässiges, bei Regen automatisch über die Gefäße fahrendes Rolldach sie vor zu hohen Niederschlagsmengen und so vor Überflutung schützte.

Für die PCP- und Atrazinversuche standen dagegen Klimaschränke zur Verfügung. Gegenüber Freiland-Klimabedingungen ist im Klimaschrank aus technischen Gründen die Beleuchtungsstärke unteroptimal. Sie betrug in Bestandeshöhe nur ca. $200 \mu\text{E}/\text{m}^2 \cdot \text{s} \approx$ im Klimaschrank 18 000 Lux.

Um die Bodentemperaturen mit Rücksicht auf die Bodentiere möglichst optimal ($11-14^\circ\text{C}$) zu halten, wechselten die Lufttemperaturen im Klimaschrank zwischen 16°C (14 Stunden bei Beleuchtung) und 10°C (10 Stunden bei Dunkelheit), während sich die relative Luftfeuchte im Tag-Nachtwechsel zwischen 80 und 90% bewegte. Bei diesen Temperatur- und Feuchtebedingungen war keine Minderung der Photosynthese und damit der Nettoprimärproduktion der beteiligten Pflanzen zu erwarten. Gleichzeitig wurde ein zu starkes Ansteigen der Bodentemperatur und eine erhöhte oberflächliche Austrocknung des Bodens vermieden; denn es besteht die Gefahr, daß sich bei zu hohen Bodentemperaturen und zu trockenem Boden *Allolobophora chlorotica* in ein Ruhestadium begibt oder durch geringe Fraß- und Bewegungsaktivität nur verminderten Kontakt mit den Umweltchemikalien hat.

3. Meßbare Auswirkungen der untersuchten Umweltchemikalien

Um die Auswirkungen von Umweltchemikalien möglichst schnell und eindeutig erfassen zu können, müssen empfindliche, schnell reagierende und technisch einfach zu messende Parameter gefunden werden, die eine Beurteilung der Schädigung des Systems zulassen.

3.1 Höhenwachstum, Blütenansatz und auftretende Nekrosen der Pflanzen

Während der zweieinhalb-monatigen Laufzeit jedes Versuchs wurden als beobachtbare Parameter der Knospen- und Blütenansatz sowie Nekrosen bis hin zum Absterben einzelner Pflanzen wöchentlich protokolliert.

Der Knospenansatz und die Blütenausbildung ergaben weder bei HCB, PCP noch beim Atrazin Abweichungen von den Kontrollkulturen, die ohne Umweltchemikalien gezogen wurden. Die Pflanzen zeigten bei allen HCB-Dosen keine Nekrosen, und es starben keine einzelnen Individuen ab.

Bei PCP-Dosen bis 50 mg pro kg Trockenboden zeigten sich ebenfalls keine beobachtbaren Auswirkungen an den Pflanzen. Allerdings starben die Pflanzen bei höheren PCP-Konzentrationen als 50 ppm im Boden vollständig ab, wobei *Lolium perenne* von allen drei Arten am längsten überdauerte.

Bei Atrazin-Gaben traten nur bei *Ajuga* Nekrosen an den Blättern auf. Bei hohen Dosierungen führte dies zum Absterben ganzer *Ajuga*-Pflanzen.

3.2 Gaswechsellmessungen an den Pflanzen

Eine empfindliche, schnell zu Ergebnissen führende und zur Früherkennung von Auswirkungen der Umweltchemikalien geeignete Methode ist die Messung des CO_2 -Gaswechsels der Pflanzen. Falls eine Substanz direkt oder indirekt einen hemmenden oder fördernden Einfluß auf die Trockensubstanz-Produktion einer Pflanze hat, so müßten die Auswirkungen an der Photosyntheseleistung schneller zu messen sein als mit der am Ende des Versuchs stattfindenden Ernte der pflanzlichen Biomasse. Ebenfalls können mit diesen Messungen Veränderungen in der physiologischen Reaktionsnorm der einzelnen Pflanzen, z.B. in der Lichtsättigung oder beim Lichtkompensationspunkt, erkannt werden.

Mit einer Gaswechselmeßanlage, wie sie von KOCH et al. (1968, 1971) beschrieben wird, wurde in zwei voll klimatisierten Küvetten die Photosyntheseleistung unter gleichen Strahlungs-, Temperatur- und Feuchtebedingungen gemessen. In eine Küvette wurde eine unbehandelte Pflanze aus der Kontrollstufe, in die andere Küvette eine mit Umweltchemikalien behandelte Pflanze luftdicht eingebettet und deren Photosyntheseleistung verglichen.

Die in Abb. 1 dargestellten Messungen wurden im Gewächshaus mit Zusatzbeleuchtung, also unter optimalen Lichtverhältnissen durchgeführt. Jedes Kreuz stellt den Mittelwert zahlreicher Messungen im Laufe einer halben Stunde am Morgen bei optimaler Photosynthese dar. In der Darstellung wird die Nettophotosynthese der behandelten *Ajuga*-Pflanze auf die zur gleichen Zeit unter gleichen Bedingungen gemessene Photosyntheseleistung der unbehandelten Pflanze in der Parallelküvette bezogen.

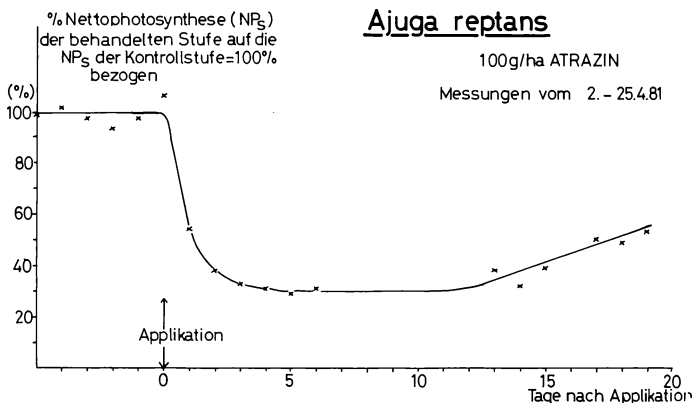


Abb. 1: Wirkung von 100 g Atrazin pro ha auf den Verlauf der maximalen morgendlichen Nettophotosyntheseleistung von *Ajuga reptans*, dargestellt in Prozent der maximalen Nettophotosyntheseleistung der Kontrollpflanze.

Ajuga blieb längere Zeit in den Meßküvetten unter konstant gehaltenen Temperatur- und Feuchtebedingungen. Die 100 g/ha entsprechende Atrazinmenge wurde nach fünf Tagen beim Begießen des Kulturgefäßes appliziert, konnte also nur über die Wurzeln aufgenommen werden. Am Tag nach der Applikation war die Photosyntheseleistung auf 50% gesunken und pendelte sich nach drei Tagen auf ca. 35% der Leistung der Kontrollpflanze ein. Nach 11 Tagen wurden in die Meßküvetten andere Individuen von *Ajuga* eingeschlossen, die auf gleiche Weise kultiviert und behandelt worden waren wie die ersteren. Die Pflanzen erholten sich ca. 14 Tage nach der Applikation wieder: Die Photosyntheseleistung begann langsam wieder anzusteigen.

Bei Anwendung von mehr als 100 g Atrazin pro ha ging die Photosyntheseleistung so stark zurück, daß die Pflanzen einige Tage lang keine positive CO₂-Gaswechselbilanz mehr zeigten. Sie erholten sich aber ebenfalls wieder, jedoch langsamer als die *Ajuga*-Pflanzen, die mit 100 g/ha behandelt waren.

Ajuga und *Trifolium* reagierten im Gaswechsel empfindlicher als *Lolium*. Nach Applikation von 400 g Atrazin/ha war für *Trifolium* und *Ajuga* keine positive Gaswechselbilanz mehr zu registrieren, während die Leistung von *Lolium* nur sehr wenig abfiel. Nach 18 bis 20 Tagen zeigte *Trifolium* erst 66% der Photosyntheseleistung im Vergleich zur unbehandelten Pflanze, *Lolium* dagegen schon wieder die volle Leistung. Diese im Gewächshaus durchgeführten Messungen konnten durch ähnliche Ergebnisse von solchen Messungen im Freiland bestätigt werden.

Messungen an Pflanzen, die mit HCB behandelt wurden, ergaben auch bei höchsten Dosen keine Einschränkung der Photosynthese für alle drei Arten.

Eine PCP-Behandlung führte nur innerhalb der ersten Woche nach Applikation zu einer Minderung der Nettophotosyntheseleistung. Langfristig streuten die Werte so stark, daß eine Minderung statistisch nicht zu sichern ist.

3.3 Phytomasse-Produktion und pflanzliche Konkurrenz

Wenn sich Chemikalien auf den Gaswechsel auswirken, ist zu erwarten, daß sie auch die Trockensubstanz-Produktion der einzelnen Arten des Modell-Ökosystems und deren Konkurrenzgleichgewicht beeinflussen. Es wurde daher nach zweieinhalbmonatiger Versuchszeit die ober- und unterirdische Phytomasse der einzelnen Arten bestimmt. Um die Auswirkungen der Konkurrenz besser beurteilen zu können, wurden beim Atrazin-versuch parallel zu den Modell-Ökosystemen im Klimaschrank auch Rein- und Mischkulturen im Gewächshaus (Tagestemperaturmittel ca. 20 °C bei 40-60% RF) gezogen.

Werden die oberirdischen Frischgewichte der drei Pflanzenarten in den Mischkulturen des Gewächshausversuches (Abb. 2a) und im Modell-Ökosystem-Versuch (Abb. 2b) aufsummiert, so zeigt sich ein starker Abfall der Summe bei steigenden Atrazingaben. Die Reinkulturen (Abb. 2a) dagegen lassen - in gleicher Weise aufsummiert - nur die Wirkung starker Dosen eindeutig erkennen und reagieren nicht so empfindlich auf Atrazingaben wie die Mischkulturen im Gewächshaus oder im Klimaschrank.

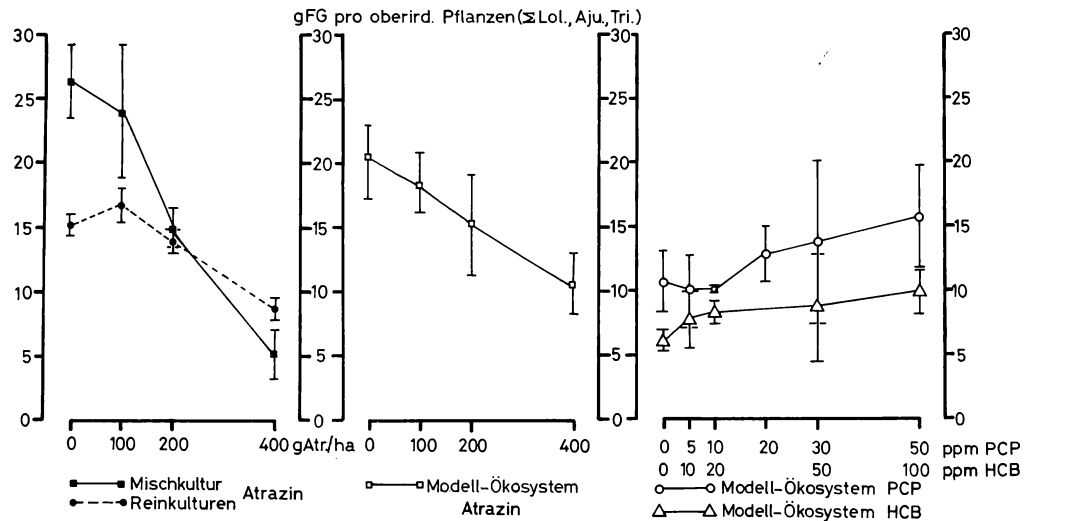


Abb. 2: Vergleichende Übersicht der Wirkungen von Atrazin, PCP und HCB auf die Summe der oberirdischen Frischgewichte aller drei Arten in Rein- und Mischkultur sowie in den Modell-Ökosystem-Versuchen.

Bei Modell-Ökosystem-Versuchen mit HCB und PCP (Abb. 2c) ließen sich an der Summe der oberirdischen Frischgewichte keine statistisch sicherbaren Auswirkungen auf die pflanzliche Produktion in den untersuchten Konzentrationsbereichen feststellen: Zur Beurteilung, ob die Differenzen der Mittelwerte der Kontrollen und der verschiedenen Dosierungen der Chemikalien als statistisch gesichert gelten dürfen, wurde eine einfaktorielle Varianzanalyse mit anschließendem Mittelwertsvergleich nach Tukey mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von $P \leq 5\%$ durchgeführt. Es war zwar ein Anstieg der oberirdischen Frischgewichte mit zunehmenden HCB- und PCP-Gaben zu vermerken, dieser ist aber statistisch ebenfalls nicht zu sichern.

Eine Verschiebung der Massenanteile zwischen den drei Arten bei steigenden HCB- und PCP-Gaben war nicht festzustellen. Obwohl kein Vergleich mit Reinkulturen möglich ist, darf eine Auswirkung auf die Konkurrenz ausgeschlossen werden.

In Abb. 3 sind die drei Arten, die drei Kulturbedingungen und die mit Gießwasser applizierten Atrazinnengen (Abszissen) in Vergleich gesetzt. Die Mittelwerte der oberirdischen Frischgewichte pro Pflanze sowie die senkrecht eingezeichneten 95%-Vertrauensbereiche sind aus jeweils acht Parallelmessungen errechnet worden. Signifikante Unterschiede zwischen den Mittelwerten sind durch waagerechte Linien unterschiedlichen Höhengniveaus unterhalb der Abszisse bezeichnet. Mittelwerte, die sich zu einer homogenen Gruppe zusammenfassen lassen, sind mit einer waagerechten Linie gleichen Höhengniveaus unterstrichen. Die Anordnung der Linien erfolgte nach der absoluten Höhe der Mittelwerte.

In Reinkultur reagierte *Lolium* auf Atrazin überhaupt nicht. Bei *Trifolium* und *Ajuga* fiel das Frischgewicht mit steigenden Atrazingaben gesichert und in ungefähr gleichem Maße ab. In Mischkultur im Gewächshaus reagierte jede der beteiligten Arten deutlicher als in Reinkultur. Sogar an *Lolium* zeigten sich Auswirkungen des Atrazins, die allerdings nur gegenüber der Kontrolle zu sichern sind. *Trifolium* wurde durch steigende Dosen des Herbizids am meisten geschwächt, aber auch bei

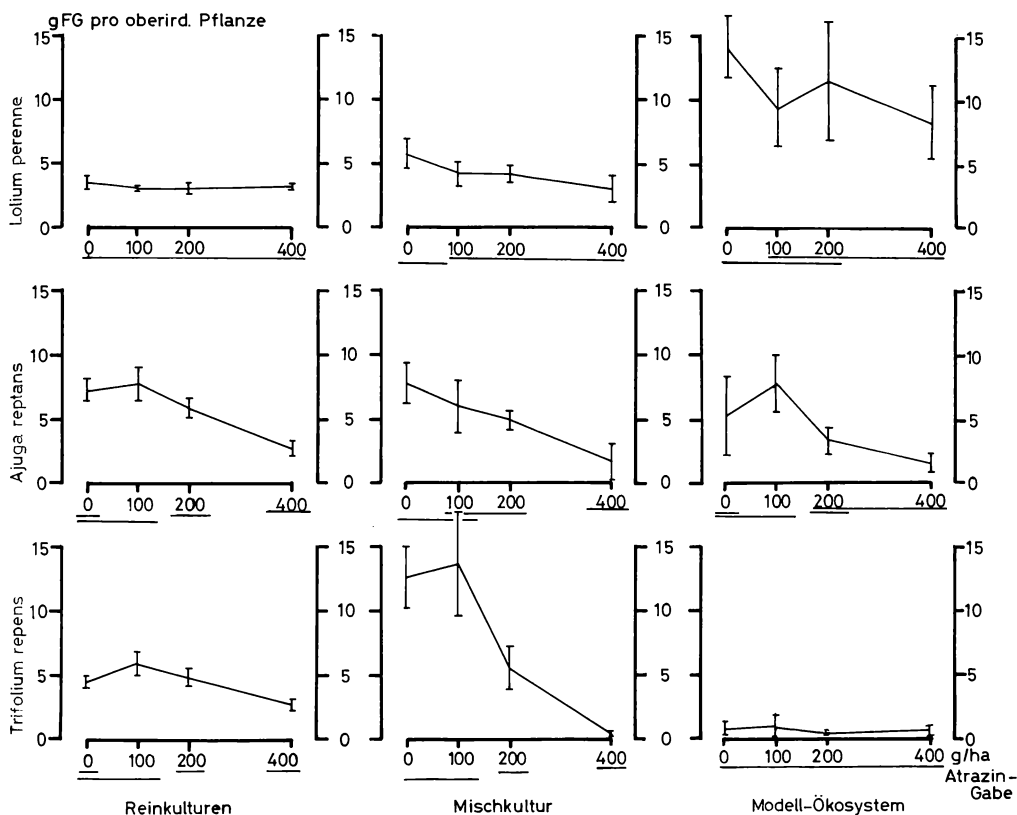


Abb. 3: Wirkung von Atrazin auf das oberirdische Frischgewicht von *Lolium*, *Ajuga* und *Trifolium* in Reinkultur, Mischkultur und im Modell-Ökosystem.

Weitere Erläuterungen siehe Abschnitt 3.3.

Ajuga gibt es signifikante Abstufungen. Erwartungsgemäß schwächte also das Herbizid Atrazin die breitblättrigen Dikotylen stärker als das Gras, so daß sich dieses trotz des relativ trockenen Mikroklimas im Gewächshaus durchsetzen konnte. *Lolium* und *Ajuga* verhielten sich in Mischkultur im Klimaschrank (Modell-Ökosysteme) prinzipiell ähnlich wie im Gewächshaus. Allerdings gedieh *Lolium* wahrscheinlich infolge der höheren Luftfeuchte wesentlich kräftiger als seine beiden Partner. Die geringe Beleuchtungsstärke führte leider dazu, daß *Trifolium* unter den Blättern seiner Konkurrenten in allen Stufen kümmerle und keine Reaktion erkennen ließ.

Zusammenfassend ist hervorzuheben, daß die Arten des Modell-Ökosystems in Mischkultur deutlicher als in Reinkultur auf chemischen Streß reagierten. Im Gewächshaus war die Reaktion ausgeprägter als im Klimaschrank, offensichtlich weil hier das Lichtklima ungünstiger ist und weil die am wenigsten empfindliche Art durch das kühlfeuchte Klima sehr begünstigt wurde.

Diese Effekte sind schon bei Berücksichtigung der oberirdischen Frischgewichte der Pflanzen meßbar, obwohl ihre unterschiedlichen Wassergehalte noch eine große Varianz aufweisen können. Bei Berücksichtigung der Trockengewichte der Pflanzen, die erst errechenbar sein werden, wenn die Rückstands-Konzentrationen der untersuchten Chemikalien vollständig ermittelt worden sind, dürften die Auswirkungen

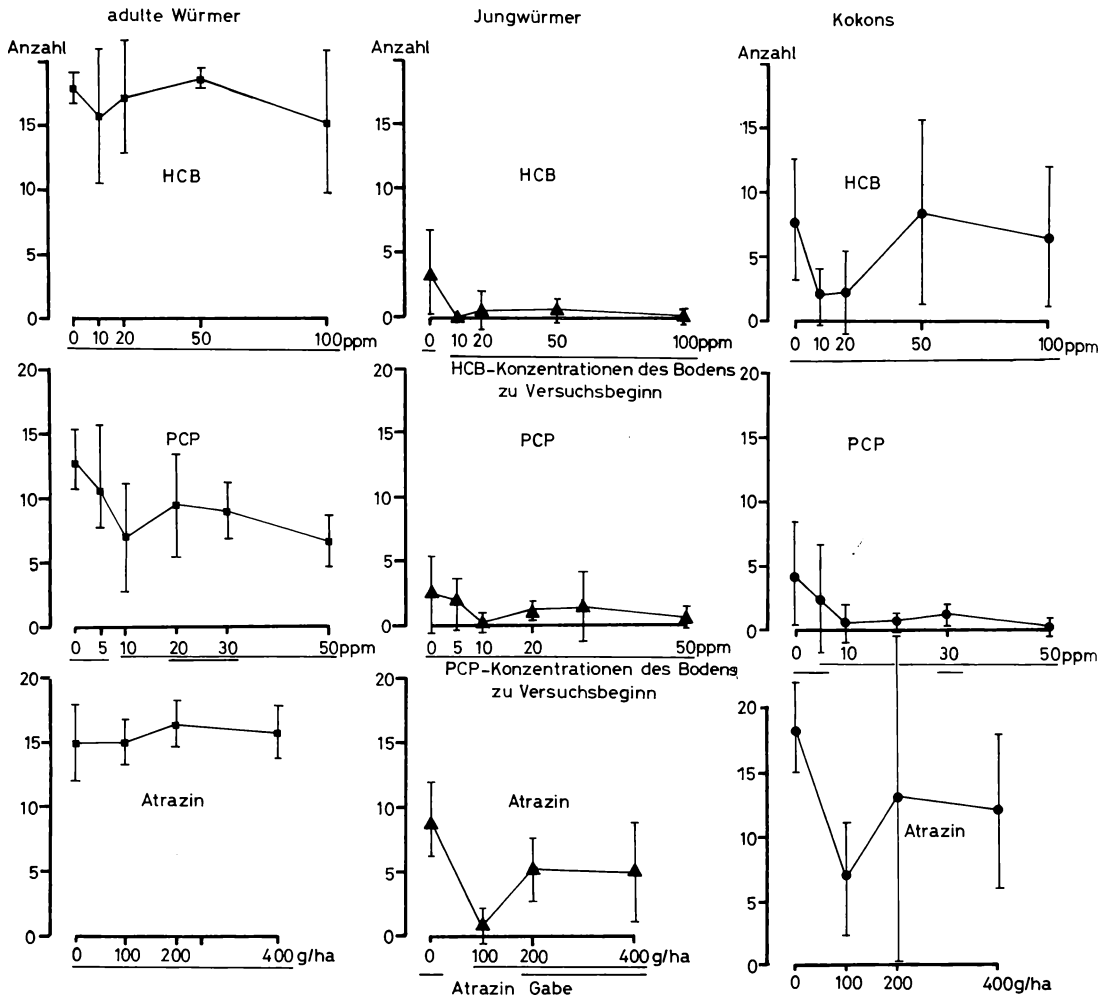


Abb. 4: Anzahl der adulten Würmer, der geschlüpften Jungwürmer und der abgelegten Kokons jeweils am Ende des HCB-, PCP- und Atrazin-Modell-Ökosystem-Versuchs.

auf die Produktion und die Effekte der Konkurrenz noch stärker und mit geringerer Varianz behaftet sein.

3.4 Auswirkungen der Umweltchemikalien auf die Regenwurmpopulation

Beim Abernten der Versuche nach 10 Wochen wurden die lebenden adulten Würmer, die abgelegten Kokons und die während der Versuchszeit geschlüpften Jungwürmer gezählt, die beim Auswaschen der Wurzeln aus dem Lößboden aufzufinden waren.

In Abb. 4 sind für alle Dosierungen des Modell-Ökosystem-Versuchs mit HCB, PCP und Atrazin die mittleren Besatzzahlen pro Gefäß, die Konfidenzspannen und die statistisch gesicherten Mittelwertsdifferenzen in Anlehnung an Abb. 3 dargestellt.

In den nicht mit Chemikalien behandelten Gefäßen lebten durchschnittlich 15 Adulte. Einige Würmer sind also während der Versuchszeit gestorben und wurden zersetzt. Daß sie das Gefäß während der Versuchszeit verlassen haben könnten, ist unwahrscheinlich, da sie in den Klimaschränken nirgends aufgefunden werden konnten.

Differenzen zwischen den Werten der Kontrollen in den drei Versuchsserien mit HCB, PCP und Atrazin, besonders in der Zahl der geschlüpften Jungwürmer und der Zahl der abgelegten Kokons, sind vermutlich auf eine jahreszeitliche Vermehrungs- und Aktivitätsrhythmik der Würmer zurückzuführen. Deshalb können die Auswirkungen der Chemikalien auf die Wurmpopulation nicht untereinander verglichen werden, sondern dürfen nur auf die Kontrollen der jeweiligen Chemikalie bezogen werden, die gleichzeitig mit den Dosierungen gezogen wurden.

HCB hatte bei edaphischer Applikation und in den angewandten Konzentrationen keine erhöhte Mortalität der Würmer zur Folge. Nur die Zahl der Jungwürmer war in den unbehandelten Böden signifikant größer als in den mit HCB kontaminierten. Die Zahl der auffindbaren Kokons streute so sehr, daß sich keine Unterschiede sichern ließen.

Ähnlich ist das Versuchsergebnis für Atrazin, das in wässriger Lösung auf den Pflanzenbestand appliziert wurde, nachdem die Würmer in den Boden eingesetzt waren. Dieses häufig angewandte Herbizid minderte im Versuch den Verjüngungserfolg der Würmer.

Bei edaphischen PCP-Gaben verringerte sich die Zahl der adulten Würmer wie auch die Zahl der abgelegten Kokons signifikant gegenüber der Kontrolle. Die Zahl der geschlüpften Jungwürmer läßt aber, bedingt durch die hohe Standardabweichung der Mittelwerte, keine gesicherte Beziehung zu den steigenden PCP-Gaben erkennen.

4. Verteilung der Umweltchemikalien im Modell-Ökosystem

Um die Verteilung der Umweltchemikalien in dem Modell-Ökosystem zu untersuchen, wurde dieses in verschiedene Ökosystem-Kompartimente aufgeteilt.

Von jedem Modell-Ökosystem wurden Proben des Bodens, der adulten Würmer und der einzelnen Pflanzenarten analysiert. Die Pflanzen wurden jeweils noch in oberirdische Streu, wie sie als vergilbte oder vertrocknete Teile dem grünen Material anhing oder vom Boden abzulesen war, in grünes Material (Blattspreiten, Blattstiele und Infloreszenzen) und in Wurzeln getrennt. Bei *Lolium* wurde zusätzlich zu diesen Fraktionen noch eine Stoppelfraktion und bei *Trifolium* noch eine Rhizomfraktion getrennt analysiert. Rückstands-Konzentrationen für eine Pflanzenart als ganzes sind als gewichtetes Mittel aus den Einzelfraktionen errechnet worden. Die Analyse der adulten Würmer erfolgte erst nach dem Austausch ihres Darminhalts. Sie wurden deshalb nach der Auslese aus dem Boden der Modell-Ökosysteme eine Woche in unbehandelte Löß-Schwarzerde gesetzt. Dadurch ist zwar mit der Elimination eines nicht bestimmbar Anteils der resorbierten Chemikalie oder deren Metabolite zu rechnen, doch erschien uns im Falle des HCB dieser Fehler - gleiche Aktivität der Würmer aus verschiedenen Konzentrationsstufen im Austauschboden vorausgesetzt - geringer zu sein als der Fehler, der auftritt, wenn die Würmer mit kontaminiertem Boden im Darm analysiert werden und so Rückstandsgehalte ermittelt werden, die wesentlich höher sind als die tatsächlich in der Wurm-Zoomasse akkumulierten.

Als Beispiel soll in der vorliegenden Arbeit die Verteilung des Hexachlorbenzols im Modell-Ökosystem erörtert werden.

4.1 HCB-Rückstands-Konzentrationen und flächenbezogene Rückstandsmengen in den Ökosystem-Kompartimenten

In den tierischen und pflanzlichen Kompartimenten sowie im Boden wurden die HCB-Rückstände nach der Extraktions- und Reinigungsmethode gewonnen, die in Abb. 5 dargestellt ist (vgl. ERNST et al. 1974). Die quantitative Bestimmung erfolgte unter optimalen gaschromatographischen Bedingungen (WOLFF, EBING 1978).

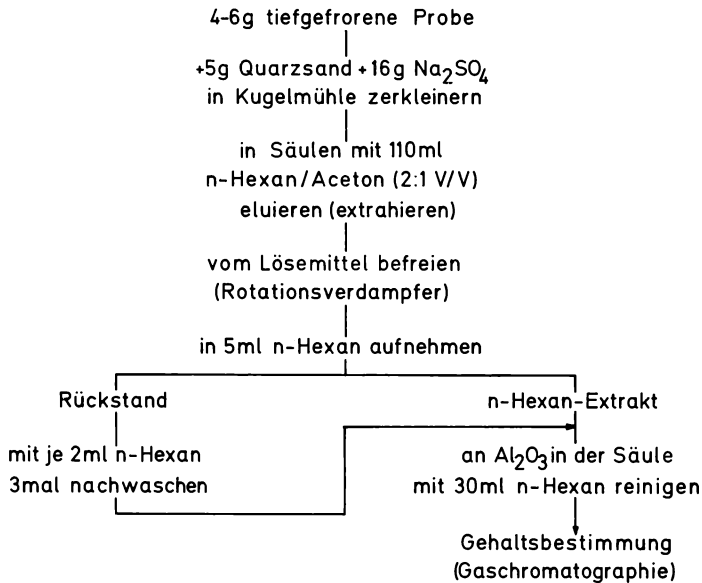


Abb. 5: Extraktion und Reinigung der HCB-Rückstände.

In Abb. 6a sind die HCB-Rückstands-Konzentrationen aller im Modell untersuchten Ökosystem-Kompartimente aufgetragen. Die Konzentrationen nehmen in Form einer Sättigungskurve bei steigender HCB-Dosis in den drei Pflanzenarten und in den Würmern zu.

Bei *Lolium*, *Trifolium* und *Allolobophora* kann man bis zu einer Dosis von 50 mg HCB pro kg Trockenboden von einer HCB-Anreicherung sprechen, da in diesen Organismen die Konzentration größer ist als im Boden, in den das HCB zu Versuchsbeginn appliziert wurde.

Anders als in den lebenden Ökosystem-Kompartimenten stieg die HCB-Konzentration im Boden zu Versuchsende mit steigenden Dosen linear in dem Maße an, wie die Konzentrationen zu Versuchsbeginn eingestellt wurden.

Bei den drei Pflanzenarten waren die höchsten HCB-Rückstände in *Lolium perenne* und *Trifolium repens* und die geringsten in *Ajuga reptans* zu finden. Die Würmer wiesen die höchsten HCB-Konzentrationen der im Modell-Ökosystem lebenden Organismen auf.

Die Verteilung der flächenbezogenen HCB-Rückstände (Abb. 6b) war etwa gleich der Konzentrationsverteilung. Allerdings waren im Boden auf Grund der Applikationsweise und des hohen Trockengewichtes im Vergleich zu den Organismen mehr als die tausendfachen HCB-Mengen vorhanden.

4.2 Prozentuale Verteilung des HCB im Modell-Ökosystem

Setzt man die Summe der HCB-Rückstände der einzelnen Pflanzenarten gleich 100, so wurde bei Kontamination mehr als 60% des HCB-Rückstandes der Pflanzen in den Wurzeln gefunden. Die restlichen HCB-Rückstände verteilen sich auf die anderen Pflanzenfraktionen, wobei die grünen oberirdischen Organe nur zwischen 0.4 - 6.0%, die Streu aber 0.8 - 35% der HCB-Rückstände der Pflanzen enthalten (Abb. 7b).

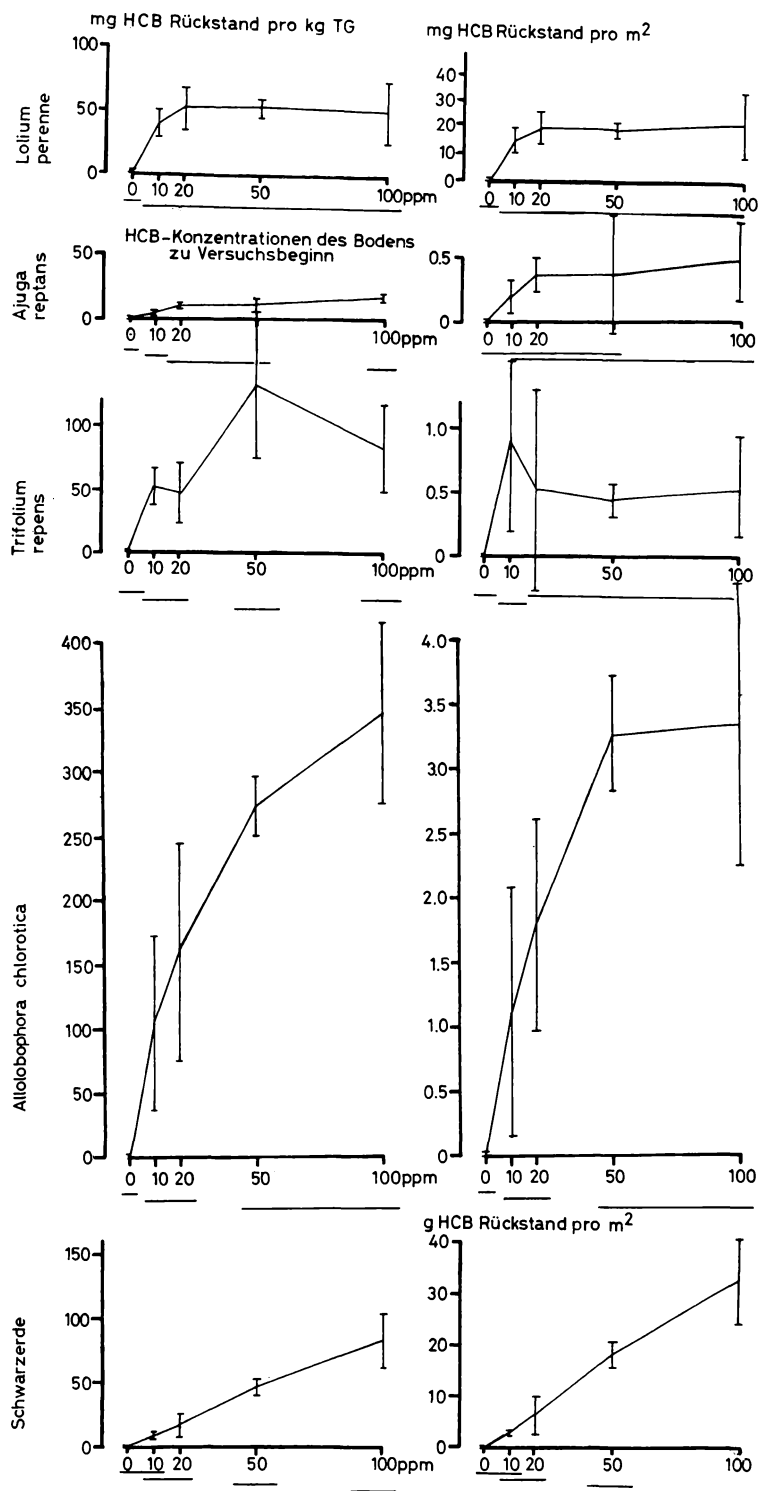


Abb. 6a: HCB-Rückstandskonzentrationen in den Ökosystemkompartimenten.
 6b: Flächenbezogene HCB-Rückstandsgehalte der Ökosystemkompartimente.

Der Vergleich zwischen relativer Phytomasse-Verteilung und relativer HCB-Rückstands-Verteilung der Pflanzen (Abb. 7a und b) verdeutlicht, daß die Wurzeln, die direkten Kontakt mit dem kontaminierten Boden hatten, überdurchschnittlich hohe Rückstände aufweisen. In den grünen Teilen ist bei edaphischer Applikation nur relativ wenig HCB aufzufinden, obwohl diese Fraktion doch einen großen Teil der Phytomasse ausmacht.

Betrachtet man die Summe der HCB-Rückstände in allen Organismen (Tab. 1), so sind 83-92% in *Lolium perenne*, das 84-91% der Biomasse im Modell-Ökosystem bildet, und nur 1.7 - 5.0% (0.8 - 3.6% Biomasse) in *Trifolium repens* bzw. 1.1 - 3.4% in *Ajuga reptans* (5.8 - 10.5% Biomasse) vorhanden. Bei Berücksichtigung des gesamten Systems sind 99.4 - 99.9% der Rückstände im Boden, also am Ort der Applikation verblieben (Tab. 2). Nur ein geringer Teil wurde von den Organismen resorbiert. Zudem ist HCB in den Pflanzen nur in sehr geringem Maße transportiert worden. Dies bestätigt Ergebnisse von FREITAG et al. (1974), die den überwiegenden Teil radioaktiv markierten HCBs, welches als Saatgutbeizmittel eingesetzt wurde, am Ort der Applikation, also im Boden oder in den Wurzeln der Pflanzen wiederfanden.

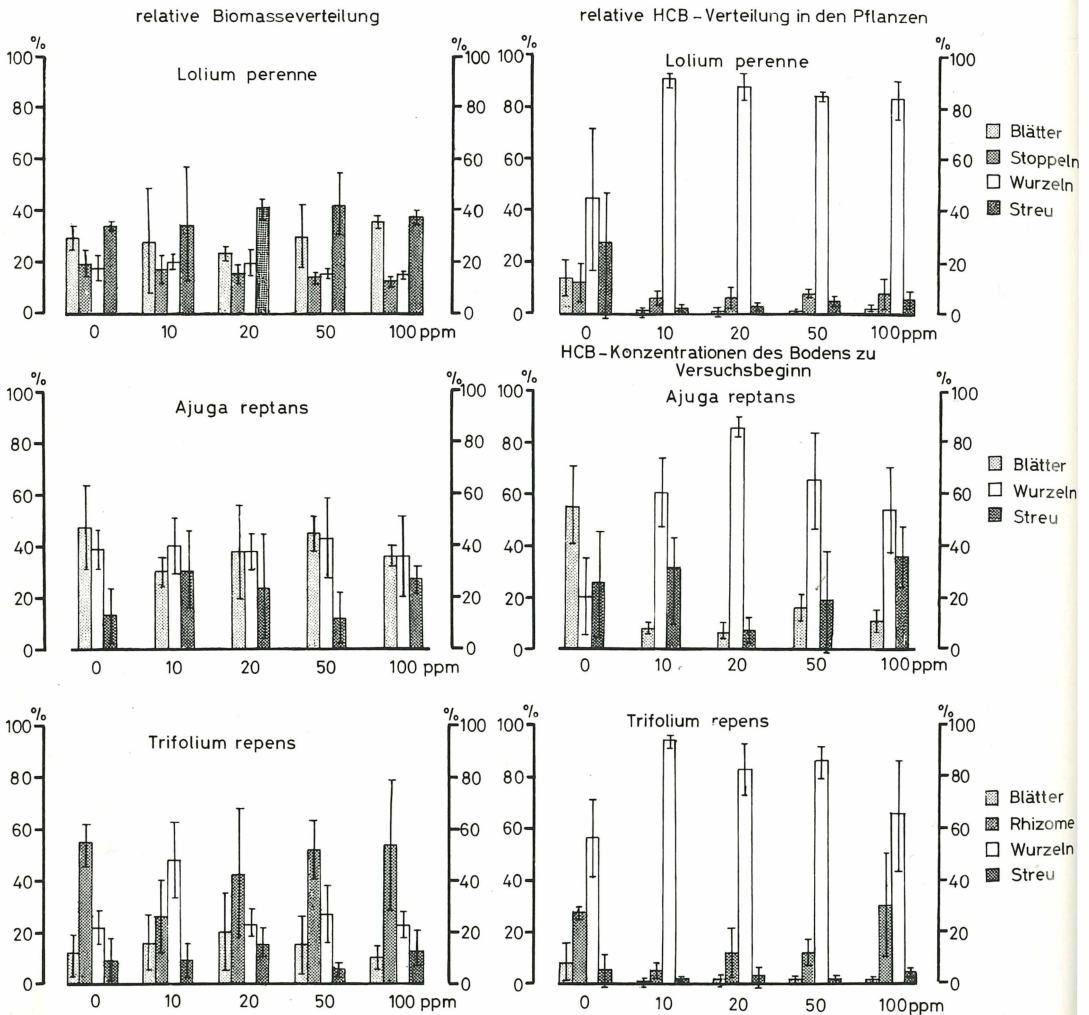


Abb. 7a: Relative Phytomasseanteile der untersuchten Fraktionen der drei Pflanzenarten.

7b: Relative Verteilung des HCB-Rückstands auf die untersuchten Fraktionen der drei Pflanzenarten.

Tab. 1: Prozentuale Anteile der einzelnen Arten an der Summe der HCB-Rückstände aller in das Modellökosystem eingebrachten Organismen.

Die prozentualen Biomassenanteile sind in Klammern gesetzt.

Konzentrationsstufe (ppm)	0	10	20	50	100
<i>Lolium perenne</i>	92.55 (84.57)	87.90 (86.21)	88.80 (88.24)	83.58 (89.81)	83.82 (90.96)
<i>Ajuga reptans</i>	3.40 (10.46)	1.14 (8.14)	1.60 (7.42)	1.57 (6.79)	1.87 (5.79)
<i>Trifolium repens</i>	2.11 (1.87)	5.03 (3.56)	2.16 (1.97)	1.70 (0.75)	1.97 (1.26)
Σ Pflanzen	98.06 (96.90)	94.07 (97.91)	92.56 (97.63)	86.85 (97.35)	87.66 (98.01)
<i>Allolobophora chlorotica</i>	1.94 (3.10)	5.93 (2.09)	7.44 (2.37)	13.15 (2.65)	12.34 (1.99)
Σ Organismen	100 (100)	100 (100)	100 (100)	100 (100)	100 (100)

Tab. 2: Prozentuale Verteilung der HCB-Rückstände auf die Ökosystem-kompartimente

Konzentrationsstufe (ppm)	0	10	20	50	100
Pflanzen	2.32	0.55	0.34	0.12	0.07
Tiere	0.05	0.03	0.03	0.02	0.01
Σ Organismen	2.37	0.58	0.37	0.14	0.08
Boden	97.63	99.42	99.63	99.86	99.92
Σ System	100	100	100	100	100

Vergleicht man die eingesetzten und die durch Rückstandsanalyse wiedergefundenen HCB-Mengen, so werden bei einer analytischen Wiederfindungsgenauigkeit von 98-99% im Mittel 85.3% des applizierten HCB als Rückstand wiedergefunden. FREITAG et al. (1974) fanden ca. 72% der applizierten Aktivität des radioaktiv markierten HCB wieder. Wo die restlichen 14.7% des applizierten HCB verblieben sind, ist nicht einwandfrei zu klären. Der Schwund kann durch Abbau, aber auch durch ein Entweichen als Gas aus dem System erklärt werden. Der geringe Schwund deutet auf einen geringen Abbau der Chemikalie und damit auf eine hohe Persistenz des HCB hin.

5. Diskussion

Aus der Verteilung des Hexachlorbenzols im Modell-Ökosystem bei edaphischer Applikation und der in Form einer Sättigungskurve ansteigenden Rückstandskonzentrationen in der Biomasse bei steigenden HCB-Dosen ist zu schließen, daß andere Applikationsformen eine andere Verteilung und möglicherweise auch andere Veränderungen des Systems bewirken. So wäre denkbar, daß der größte Teil des HCB im oberirdischen Pflanzenmaterial wiederzufinden wäre, wenn das HCB als Suspension auf den Pflanzenbestand gespritzt würde.

Gleichfalls wird der Zeitpunkt der Applikation der Chemikalien im Modell-Ökosystem einen Einfluß auf die Auswirkungen des Stoffes haben. Wenn dies im Falle des HCB und des PCP schon bei der Pflanzung ausgebracht worden ist, so können ganz andere Auswirkungen auftreten, als wenn das HCB oder PCP auf ein Modell-Ökosystem aufgebracht wird, in dem sich die Interferenz der Organismen schon auf einen Gleichgewichtszustand eingependelt hat.

Aus diesen Gründen sind bei weiteren Tests mit diesem Modell-Ökosystem die Anwendungsmuster der zu testenden Chemikalien mehr zu berücksichtigen. Ebenfalls ist gegen den mit HCB und PCP durchgeführten Test einzuwenden, daß er mit viel zu hohen und nicht praxisgerechten Aufwandsmengen durchgeführt wurde. Es ist aber zu diskutieren, ob eine übernormal hohe Aufwandsmenge nicht schnellere Auswirkungen auf das System zeigt und rascher eine analytisch unproblematisch festzustellende Verteilung im System zur Folge hat.

Um die Aussagekraft der Ergebnisse, die durch Versuche mit dem Land-Ökosystem-Modell gewonnen wurden, zu überprüfen, wurden von der Vegetationsperiode 1980 an auch Untersuchungen an sogenannten "Bezugsökosystemen", d.h. an Weiden (*Lolio-Cynosuretum*) in der Umgebung Göttingens durchgeführt. Eine Auswertung kann aber erst nach Abschluß der Messungen erfolgen.

Falls es in diesen Bezugsökosystemen zu gleichen Auswirkungen und einer gleichen Verteilung der untersuchten Umweltchemikalien wie im Modell-Ökosystem kommen wird, ist diese Methode geeignet, um kurzfristig die Auswirkungen und die Verteilung von Chemikalien in Land-Ökosystemen vorausszusagen. Bei schwach wirksamen Stoffen wird diese Methode jedoch Langzeit-Untersuchungen nicht ersetzen können.

Die Untersuchungen werden im Rahmen eines Forschungsprojekts des Projektträgers Umweltchemikalien des Bundesministeriums für Forschung und Technologie gemeinschaftlich vom Lehrstuhl für Geobotanik, von der Abteilung Ökologie des II. Zoologischen Institutes und vom Interfakultativen Lehrgebiet Chemie (Inst. f. Bodenwissenschaften) der Universität Göttingen durchgeführt.

Literatur

- ELLENBERG H., 1978: Vegetation Mitteleuropas mit den Alpen in ökologischer Sicht. 2. Aufl. Stuttgart (Ulmer): 981 S.
- ERNST W., SCHAEFER R.G., GOERKE H., EDER G., 1974: Aufarbeitung von Meerestieren für die Bestimmung von PCB, DDT, DDE, DDD, HCH, HCB. Z. Anal. Chem. 272: 358-363.
- FREITAG D., WEISGERBER I., KLEIN W., KORTE F., 1974: Schicksal von Hexachlorbenzol-¹⁴C in Sommerweizen und Boden nach Saatgutbehandlung. Chemosphere 4: 138-142.
- Deutsche Forschungsgemeinschaft (Senatsausschuß für Umweltforschung), 1979: Beiträge zur Beurteilung der Umweltwirksamkeit chemischer Stoffe. Boppard (Boldt): 40 S.
- KLÖPFER W., ZIETZ E., RIPPEN G., SCHÖNBORN W., FRISCHE R., 1979: Merkblätter über Referenzchemikalien. Jülich (Projektträgererschaft Umweltchemikalien KFA).
- KOCH W., KLEIN E., WALZ H., 1968: Neuartige Gewebselmeßanlage für Pflanzen in Laboratorium und Freiland. Siemens-Zeitschr. 42: 392-404.
- KOCH W., LANGE O.L., SCHULZE E.D., 1971: Ecophysiological investigations on wild and cultivated plants in the Negev-desert. I. Methods: A mobile laboratory for measuring carbon dioxide and water vapour exchange. Oecologia (Berl.) 8: 296-309.
- KORTE F., KLEIN W., PARLAR H., SCHEUNERT T., 1980: Ökologische Chemie. Stuttgart (Thieme): 212 S.
- SCHEELE B., 1980: Reference chemicals as aids in evaluating a research programme - selection aims and criteria. Chemosphere 9: 293-309.
- SCHUPPENER H., 1974: Die Aufnahme von Pentachlorphenol (PCP) aus Anzuchtlösungen durch Mais - eine methodische Studie zur Ökochemie lipophiler toxischer Verbindungen. Diss. Univ. Göttingen: 105 S.
- SUZUKI T., NOSE K., 1970: Decomposition of pentachlorophenol in farm soil. I.: Some factors relating PCP decomposition. Noyakuseisangujutzu 22: 27-30.
- SUZUKI T., NOSE K., 1971: Decomposition of pentachlorophenol in farm soil. II.: PCP metabolism by a microorganism isolated from soil. Noyakuseisangujutzu 26: 21-24.
- WOLFF G., EBING W., 1978: Eine Methode zur einheitlichen Reinigung und Bestimmung von Chlorkohlenwasserstoffinsektizidrückständen in verschiedenen Getreidearten. J. Chromatography 147: 213-219.

Adressen

Dr. Willy Werner
Prof. Dr. Heinz Ellenberg
Walter Stikan
Lehrstuhl für Geobotanik Univ.
Untere Karspüle 2
D-3400 Göttingen

Prof. Dr. Matthias Schaefer
Regine Strüve-Kusenber
Abteilung Ökologie
II. Zoologisches Institut
Berliner Str. 28
D-3400 Göttingen

Dr. Ahmed Kaihry
Dr. Ulrich Müller-Wegener
Prof. Dr. Wolfgang Ziechmann
Institut für Bodenwissenschaften
von Siebold-Str. 2
D-3400 Göttingen

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

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

Jahr/Year: 1983

Band/Volume: [10_1983](#)

Autor(en)/Author(s): Werner Willy, Ellenberg Heinz, Stickan Walter, Schaefer Matthias, Strüve-Kusenber Regine, Kaihry Ahmed, Müller-Wegener Ulrich, Ziechmann Wolfgang

Artikel/Article: [Auswirkungen und Verteilung von Umweltchemikalien in einem Land-Ökosystem-Modell 425-436](#)