15 Pestizide im System Boden - Pflanze

TT-Leiter: E. Schulz

Bearbeiter: F. Böhme, K. Heinrich, A. Quarta, K. Schäfer & E. Schulz

UFZ Leipzig-Halle GmbH, Sektion Bodenforschung, Halle/Saale

Abstract

Pesticides in the soil-plant system

One major requirements for evaluating the risks of soil contamination is investigations into the long-term fate of xenobiotics in the soil—plant system. This includes the transfer of these substances into plant biomass and hence the possible risk of entry into the food chain or their influence on quality-determining plant components. Xenobiotics are introduced to a certain degree into the soil-plant system for special purposes, e.g. as pesticides. However, harmful substances may also penetrate into soil after incomplete industrial combustion process or from the contaminated wastewater of chemical plants and mining operations. Furthermore, emitted or ubiquitous pollutants may reach other environmental compartments via pathway air. In the case of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH), atmospheric deposition is the main source of contamination for the soil surface. The results on the fate and behaviour of organic xenobiotics in the soil—plant system are summarized below.

- ⇒ Soil organic matter (SOM) influences soil transformation processes, including the uptake of nutrients and pollutants as well as their transport to deeper soil layers
- ⇒ The uptake of organic xenobiotics from soil by plants depends on the physicochemical properties of the substance
- ⇒ SOM considerably influences the availability of chemicals in soil (concentration in soil solution, sorption)
- ⇒ There is a strong negative linear correlation between total organic carbon content (TOC) and the uptake of xenobiotics (lindane and methoxychlor) by plants
- ⇒ Pesticides applied to plant leaves may penetrate the leaf surface and may be transported to other plant parts
- ⇒ Pesticides can be transported from leaves via roots into soil
- ⇒ Plant-protecting agents (PPA) may influence plant metabolic processes depending on plant species and increase or decrease
 - Water uptake
 - Dry matter yield
 - Nitrogen uptake
- ⇒ PPA application in recommended doses does not negatively influence plant quality measured by the amino acid content of the plants
- ⇒ Increased contents of proline in plant material as an indicator of stress situations of plants (frost, water depletion, salinity etc.) point to possible plant stress reactions caused by PPA applications
- ⇒ Availability of chemicals in the soil is not only influenced by substance specific physicochemical properties; SOM strongly determines it by associations with SOM fractions of different stabilization degree (concentration in soil solution, sorption processes, mineral/organic complexes, etc.)
- \Rightarrow Content of xenobiotics in hot-water extractable SOM fractions seem to be suitable for estimating availability for uptake by plants. There is a strong linear correlation ($r^2 = 0.993$)

- between the content of xenobiotics in hot water extractable fraction and their uptake by maize in a greenhouse pot experiment
- ⇒ The content of xenobiotics in granulodensimetric SOM fractions gives information about preferred linkages/associations with SOM fractions of differing stability
- ⇒ Relatively high concentrations and enrichment factors of xenobiotics in clay-associated SOM fraction underline the importance of sorption processes as well as processes of interactions between xenobiotics and mineral-organic complexes/associations (immobilization)
- ⇒ Measurements of the immission and/or deposition of air-transported organic pollutants, e.g. PAH, allow the living quality of regions to be estimated
- ⇒ A clear seasonal dynamic was visible from PAH immissions
- ⇒ Transport and in particular lignite combustion were identified as sources of PAH immission concentrations at the experimental site in Bad Lauchstädt near Halle/Saale
- ⇒ Seasonal dynamics of PAH concentrations in plant material (deposition measurements) were very much higher compared to immission measurements, but mainly comprises the gaseous deposition of lower condensed PAHs
- ⇒ In contrast to plants, soils as a deposition matrix show no selectivity regarding accumulating PAHs of different condensation degree
- \Rightarrow The amounts of PAHs deposited at the experimental site Bad Lauchstädt were very low: 1.5 g/ha in the 0-1 cm soil layer.

Zusammenfassung

Für die Beurteilung von Gefährdungen aus Bodenkontaminationen sind Untersuchungen zum Langzeitverhalten dieser Fremdstoffe im System Boden-Pflanze eine wichtige Voraussetzung. Dazu ist u.a. die Frage eines möglichen Transfers dieser Stoffe in die pflanzliche Biomasse und damit verbundenen Risikos des Eintritts in die Nahrungskette bzw. der Wirkung solcher Stoffe auf qualitätskennzeichnende Pflanzeninhaltsstoffe von Bedeutung. Die Fremd- oder Problemstoffe können einerseits im Falle von Pflanzenschutzmitteln bis zu einem gewissen Grade gewollt in das System Boden-Pflanze eingetragen werden, sie können aber ebenfalls durch unsachgemäße industrielle Produktion oder nach Havarien dorthin gelangen. Darüber hinaus können emittierte Fremdstoffe über den Luftpfad auf und in Pflanzen und Böden gelangen (Immissionen), wobei z.B. für die Stoffgruppe der polyzyclischen aromatischen Kohlenwasserstoffe (PAK) die atmosphärische Deposition die Hauptkontaminationsquelle für Böden ist. Die Ergebnisse der Untersuchungen zum Verhalten von organischen Fremdstoffen im können wie folgt zusammengefaßt werden:

- ⇒ Die organische Bodensubstanz (OBS) beeinflusst entscheidend die im Boden ablaufenden Stofftransformationsprozesse, somit auch die Aufnahme von Nähr- und Schadstoffen sowie deren Verlagerungstendenzen in tiefere Bodenschichten.
- ⇒ Die Aufnahme von organischen Fremdstoffen durch Pflanzen aus dem Boden ist abhängig von deren physiko-chemischen Eigenschaften.
- ⇒ Die OBS beeinflußt entscheidend die Verfügbarkeit von Chemikalien im Boden (Konzentration in der Bodenlösung, Sorptionsprozesse)
- ⇒ Zwischen dem TOC Gehalt des Bodens und der Aufnahme von Pestiziden durch Pflanzen besteht eine strenge negative Korrelation.
- ⇒ Nach Blattapplikation können Wirkstoffe über das Blatt aufgenommen und in weitere Pflanzenteile transportiert werden.
- ⇒ Über das Blatt aufgenommene Fremdstoffe können nach Transport in die Wurzel auch in den Boden gelangen.
- ⇒ Pflanzenschutzmittel (PSM) können den Stoffhaushalt von Pflanzen beeinflussen. Sie bewirken bei unterschiedlichen Pflanzen Steigerung oder auch Verringerung von
 - Wasseraufnahme

- Trockenmasseertrag und
- N-Entzug.
- ⇒ Der Einsatz von PSM in empfohlener Dosierung hatte keine negativen Einflüsse auf die Qualität des Pflanzenmaterials gemessen am Aminosäuregehalt der Pflanzen.
- ⇒ Erhöhte Prolingehalte (Streßanzeiger) im Pflanzenmaterial deuten darauf hin, daß ähnlich wie bei Frost, Wassermangel, Salinität etc. durch PSM-Anwendung Streßreaktionen bei Pflanzen eintreten können.
- ⇒ Die OBS hat entscheidenden Einfluß auf die Verfügbarkeit von Chemikalien im Boden (Konzentration in der Bodenlösung, Sorptionsprozesse).
- ⇒ Die Erhöhung der Verfügbarkeit von Xenobiotika resultiert aus
 - stofflichen Eigenschaften
 - Bindungen / Assoziationen zu unterschiedlich stabilisierten Fraktionen der OBS.
- ⇒ Der Gehalt von Xenobiotika in der heißwasserextrahierbaren OBS-Fraktion scheint als Kriterium zur Abschätzung ihrer Verfügbarkeit für eine Aufnahme durch Pflanzen geeignet zu sein. Es besteht eine enge Korrelation zwischen deren Anteil in der Heißwasserfraktion und ihrer Aufnahme durch Mais im Gefäßversuch.
- ⇒ Der Gehalt von Xenobiotika in granulodensimetrischen Fraktionen liefert Informationen über bevorzugte Bindungen/Assoziationen zu Bodenfraktionen unterschiedlicher Stabilität.
- ⇒ Hohe Konzentrationen und Anreicherungsfaktoren von Xenobiotika in der Tonfraktion unterstreichen die Bedeutung von Sorptionsprozessen bzw. der Wechselwirkungen mit organomineralischen Komplexen / Assoziaten bezüglich einer Immobilisierung.
- ⇒ Immissions- und/oder Depositionsmessungen von luftgetragenen organischen Schadstoffen (PAK) erlauben die Beurteilung der Lebensraumqualität von Regionen.
- ⇒ Die Immissionskonzentrationsmessungen zeigten einen ausgeprägten jahreszeitlichen Gang
- ⇒ Als Herkunftsquelle wurde im ländlichen Gebiet des Standortes Bad Lauchstädt (Region Halle/Saale) Braunkohleverbrennung und Verkehr identifizert (Immissionskonz. aus PAK-Profilen der Pflanzen nur eingeschränkt möglich).
- ⇒ Der jahreszeitliche Gang der PAK-Gehalte von Pflanzen (Depositionsmessungen) zeigte sich viel ausgeprägter, berücksichtigt aber hauptsächlich die gasförmige Deposition (niedrig kondensierte PAK).
- ⇒ Bodenmaterialien als Depositionsmatrix zeigten keine Selektivität in Bezug auf die Akkumulation von PAK.
- ⇒ Die PAK-Depositionsmengen am Meßstandort (Bad Lauchstädt) sind sehr gering und betragen jährlich 1,5 g / ha (bezogen auf die Bodenschicht 0-1 cm).

15.1 Einleitung

Böden als Existenzgrundlage für den Menschen haben materielle und immaterielle Funktionen zu erfüllen. Neben einer der wichtigsten Funktionen, der Produktion von Nahrungsmitteln, sind die Filter-, Puffer- und Transformationsfunktion von entscheidender Relevanz für angrenzende Umweltkompartimente. Als komplexes System verfügen Böden resultierend aus diesen Eigenschaften über ein z.T. erhebliches Selbstreinigungspotential gegenüber schädigenden Einflüssen. Aufgrund der relativen Systemstabilität und der darin langsam ablaufenden Prozesse werden Schädigungen erst dann erkannt, wenn negative Effekte an den angrenzenden Kompartimenten (Atmosphäre, Hydrosphäre, Biosphäre) sichtbar und messbar sind, wobei nach einem Überschreiten von Systembelastungsgrenzen die Möglichkeiten der Umkehr von Schadwirkungen meist lange Zeiträume erfordern.

Belastungen von Böden können heute analytisch relativ leicht nachgewiesen werden und die technischen Möglichkeiten, immer geringere Mengen von Schadstoffen nachweisen zu können, verbessern sich ständig. Die Grenzwerte für Schadstoffe in Wässern oder Böden unterschiedlicher Nutzungsart belegen dieses ebenso. Weitaus schwieriger ist es einzuschätzen, inwieweit eine Schadbelastung auch ein Risiko für andere Umweltkompartimente oder für den Menschen darstellt. Die Risikoabschätzung hängt dabei nicht nur von den stofflichen Eigenschaften der chemischen Stoffe selbst ab, sondern auch die unterschiedlichen physikalischen, chemischen und biologischen Eigenschaften der Böden sowie die äußeren Witterungsbedingungen bestimmen weitgehend das Verhalten dieser Stoffe im Boden.

Die dem Boden zugeführten Stoffe bzw. Stoffgemische werden dort in unterschiedlicher Weise akkumuliert, transportiert oder metabolisiert, so dass eine Risikoabschätzung dieser Teilprozesse je nach Nutzung der betroffenen Flächen als Einzelbetrachtung oder im Komplex erfolgen muss. Dazu gehören Aussagen zur Akkumulation von Stoffen im Boden, zur Mobilität dieser Stoffe hinsichtlich der Verfügbarkeit für die Aufnahme durch die Pflanze, zu deren Wirkung auf die Pflanze selbst sowie zu den Wechselwirkungen von Fremdstoffen mit Bodenfraktionen unterschiedlicher Stabilität.

Die Aufnahme von Wirkstoffen kann auf verschiedenen Wegen erfolgen (TOPP et al. 1986):

- ⇒ Aufnahme durch das Wurzelsystem und anschließende Translokation mit dem Transpirationsstrom
- ⇒ Aufnahme aus der Luft nach Verdunstung
- ⇒ Aufnahme über die Kutikula nach Kontamination der Pflanze (Staub, Boden, Blattspritzung)

⇒ Aufnahme und Transport in Ölzellen (bei ölhaltigen Pflanzen).

Werden Pflanzenschutzmittel (PSM) auf den Boden appliziert, kann ihre Aufnahme durch die Pflanze über das Wurzelsystem in gelöstem Zustand mit dem Bodenwasser erfolgen. Haupttransportweg ist zunächst das Xylem. Die Mitbehandlung des Bodens bei der Applikation von PSM ist praktisch nicht zu vermeiden und ist zur Bekämpfung bodenbürtiger Schaderreger sowie bei Bodenherbiziden ohnehin Voraussetzung für ihre Wirkung. Bei der Applikation von PSM im Bestand (Blattapplikation) können die Wirkstoffe direkt über die oberirdischen Pflanzenteile (Blätter, Stengel) aufgenommen werden. Von dort können sie über das Phloem zu anderen Pflanzenteilen verlagert werden (EBING et al. 1995, SCHEUNERT et al. 1986, SCHROLL et al. 1992 u.v.a.).

Zur Erarbeitung von Nutzungsstrategien für Problemstandorte (Schulz et al. 1997, Kalbitz 1996, Heinrich & Schulz 1996) ist eine Einschätzung der Möglichkeit des Übergangs von Schadstoffen vom Boden in pflanzliche Biomasse und damit des Eintritts dieser Stoffe in die Nahrungskette erforderlich. Durch die Aufnahme von Wirksubstanzen nach PSM-Einsatz durch die Pflanze können sich sowohl eine Veränderung von Menge und Verteilung von Pflanzeninhaltsstoffen wie auch der Pestizidrückstände in der Pflanze ergeben. Untersuchungen zu dieser Thematik sind von besonderer Relevanz, da dies direkt die Nahrungskette betrifft (Essers et al. 1998). Darüber hinaus können PSM auch direkt den Stoffkreislauf von Pflanzen beeinflussen (z.B. LADONIN 1980, Chabrol et al. 1988, Samersov & Prishchepa 1991, Thakur et al. 1988).

Die Einschätzung der Mobilität und Verfügbarkeit von organischen Schadstoffen erfolgt bisher n-Octanol / anhand substanzspezifischer Eigenschaften (Wasserlöslichkeit, Wasser-Verteilungskoeffizient) bzw. der Verteilungskoeffizienten der Substanz zwischen Boden und Bodenlösung und nicht über die Bestimmung mobilisierbarer Anteile durch differenzierte extraktive Verfahren wie z.B. bei Schwermetallen. Die Aufnahme von Fremdstoffen durch Pflanzen wird neben den stofflichen Eigenschaften der Substanz selbst entscheidend von den Wechselwirkungen dieser Stoffe mit der organischen Bodensubstanz (OBS) beeinflußt, die Pools unterschiedlicher Verweilzeit und damit Stabilität beinhaltet (KÖRSCHENS 1997). Eine besondere Rolle kommt dabei Fraktionen der OBS zu, an die lösliche und (bio)verfügbare Anteile von Nähr- und Schadstoffen gebunden sind. Demgegenüber können Fremdstoffe aufgrund ihrer engen Wechselwirkungen zu stabilisierten Pools der OBS bzw. Komponenten des Mineralkörpers des Bodens, wie z.B. zu organo-mineralischen Komplexen (OMK) oder Assoziaten, immobilisiert werden, wodurch ein geringeres Risiko für benachbarte Umweltkompartimente resultieren kann (SCHULZ et al. 1997). Vorrangiges Ziel ist demzufolge die Isolierung und Charakterisierung von relevanten Pools der OBS, die hinsichtlich ihrer Verweilzeit im Boden und damit ihrer Stabilität und Umsatzgeschwindigkeit differieren. Die Isolierung einer leicht umsetzbaren Fraktion der OBS kann über eine Heißwasserextraktion erfolgen (SCHULZ 1990, SCHULZ 1997). Eine Stabilisierung von OBS kann durch Bindung an den Mineralkörper des Bodens erfolgen und auf echten Bindungen zu Bodentonmineralen bzw. Sorptionskomplexen beruhen (TADJERPISHEH 1988). Diese Wechselwirkungen zwischen OBS und Tonmineralen sind typische Prozesse im Boden und führen zur Bildung von organo-mineralischen Komplexen (OMK) unterschiedlichen Stabilisierungsgrades (GREENLAND 1965a, GREENLAND 1965b; HUANG & SCHNITZER 1986). Dieser durch Wechselwirkungen mit dem Mineralkörper des Bodens physikalisch stabilisierte OBS-Pool kann z.B. über physikalische Fraktionierungsmethoden, z.B. eine Partikelgrößenfraktionierung abgetrennt werden. In Kombination dazu scheint eine weitere Fraktionierung nach unterschiedlicher spezifischer Dichte Fraktionen der OBS zu liefern, die nur locker oder nicht mit den Bodentonen verbunden und physikalisch wenig oder nicht stabilisiert sind.

Neben Pestiziden, Dioxinen/Furanen sowie Polychlorierten Biphenylen (PCB) ist die Gruppe der Polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffe (PAK) typisch für weit verbreitete organische Fremdstoffe. Die ubiquitär vorkommenden PAK entstehen durch unvollständige Verbrennung organischer Stoffe; die Hauptquelle ist die Verbrennung fossiler Energieträger. Sie werden fast ausschließlich über den Luftpfad in die Umwelt eingetragen und können daher als Modellsubstanzen für atmogene Deposition von Spurenstoffen betrachtet werden. Vor allem der Boden bildet für die PAK eine wichtige Schadstoffsenke. Für die Stoffgruppe der PAK ist die atmosphärische Deposition die Hauptkontaminationsquelle für Böden (GRIMMER et al. 1972). Während die Emissionsquellen der PAK bekannt sind, sind Verweildauer und Transportdistanz der PAK in der Luft sowie die jährlichen Eintragsmengen selbst jedoch noch weitgehend unbekannt. Bisherige Angaben beruhen meist auf großräumigen Schätzungen (FÜHR et al. 1986; JONES 1980). Besonders für agrarisch genutzte Böden und Waldböden ist jedoch eine Abschätzung zukünftiger Einträge im Rahmen von Vorsorgemaßnahmen wichtig, um Belastungen des Bodens zu vermindern. Neben einer Eintragsanalyse ist auch der Verbleib der Schadstoffe im Boden wichtig; Gefährdungspotentiale liegen in den Austragswegen, wie beispielsweise Aufnahme durch Pflanzen oder Versickerung mit nachfolgender Grundwasserkontamination.

15.2 Einfluss von Bodenart und OBS auf den Transfer organischer Fremdstoffe vom Boden in die Pflanze

Im Rahmen der Dissertation "Untersuchungen zum Boden/Pflanze – Transfer ausgewählter organischer Umweltschadstoffe in Abhängigkeit von Bodeneigenschaften" (HEINRICH 1998) wurde anhand von Gefäßversuchen modellhaft die Aufnahme der Organochlorpestizide Lindan und Methoxychlor durch Mais in Abhängigkeit von der Bodenart, dem Gehalt an organischem Kohlenstoff (Corg) sowie der Pestizidkonzentration untersucht. Dazu wurden Böden der jeweils ungedüngten bzw. organisch/mineralisch gedüngten Variante zweier Dauerfeldversuche der Standorte Thyrow und Bad Lauchstädt sowie einer ehemaligen Stalldung/Gülle-Deponie am Standort Bad Lauchstädt verwendet (Tab. 15.1).

Tab. 15.1) Charakterisierung der Böden (Entnahmetiefe: 0 – 30 cm)

	Nährstoffmangelversuch Thyrow (Tieflehm-Fahlerde)		Ausgleichs- Fläche Thyrow	Statischer Düngungsversuch Bad Lauchstädt (Löβ-Schwarzerde)		Stalldung/ Gülle-Deponie Bad Lauchstädt		
	ohne Düngung	organ./min. Düngung		ohne Düngung	organ./min. Düngung			
Ton (%)	0,3	0,2	2,7	27,8	20,4	19,9		
C _{org.} (%)	0,37	0,70	0,56	1,57	2,03	3,07		
N _t (%)	0,03	0,05	0,04	0,14	0,22	0,31		
C/N	12,3	14,0	14,0	11,2	9,1	9,9		

Dotierung: jeweils 50 mg/kg Lindan und Methoxychlor homogen in den Boden eingemischt

Es konnte gezeigt werden, daß die beiden Pestizide in der Tieflehm-Fahlerde (Thyrow) besser für die Aufnahme durch Mais verfügbar waren als in der humusreicheren Löß-Schwarzerde (Bad Lauchstädt). Der Pestizidgehalt in Mais (Gesamtpflanze) korrelierte negativ mit dem C_{org}-Gehalt des Bodens (r²=0,82) (Abb. 15.1).

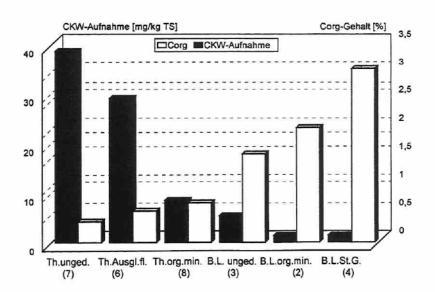
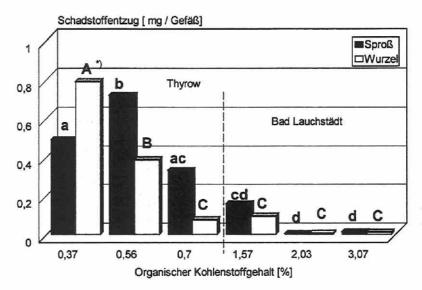


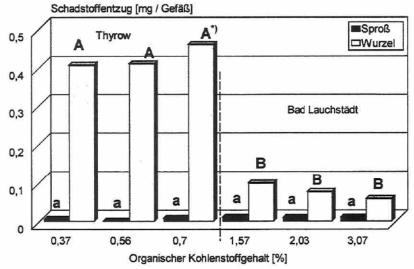
Abb. 15.1)
Abhängigkeit der Aufnahme von Organochlorpestiziden (Summe Lindan und Methoxychlor = CKW) durch Mais (n=4) im Gefäßversuch vom Corganation of Cor

Neben dem Einfluss der Bodenart (Tongehalt) sowie dem C_{org} des Bodens wird die Aufnahme der Wirksubstanzen durch die physiko-chemischen Eigenschaften der Substanzen selbst beeinflußt (Abb. 15.2 u. 15.3).



") unterschiedliche Buchstaben stehen für signifikante Unterschiede in der Schadstoffaufnahme

Abb. 15.2)
Einfluss des organischen Kohlenstoffgehaltes des Bodens auf die Aufnahme von Lindan durch Maispflanzen (n=4) im Gefäßversuch mit Löβ-Schwarzerde Bad Lauchstädt) und Tieflehm-Fahlerde (Thyrow)



^{*)} unterschiedliche Buchstaben stehen für signifikante Unterschiede in der Schadstoffaufnahme

Abb. 15.3)
Einfluss des organischen Kohlenstoffgehaltes des Bodens auf die Aufnahme von Methoxychlor durch Maispflanzen (n=4) im Gefäßversuch mit Löβ-Schwarzerde (Bad Lauchstädt) und Tieflehm-Fahlerde (Thyrow)

Aus dem Vergleich des Verhaltens beider Substanzen ist ersichtlich, dass bis zu einem C_{org}-Gehalt von 0,56 % das besser wasserlösliche Lindan gegenüber dem schlecht wasserlöslichen Methoxychlor bevorzugt von den Pflanzen aufgenommen wurde. Bei einem C_{org} von 0,7 % wurden etwa gleiche Mengen der Wirkstoffe aufgenommen, wobei sich der Hauptteil des Lindans im Maissproß, das Methoxychlor hauptsächlich in den Pflanzenwurzeln befand.

Der Vergleich der aus beiden Bodenarten von den Pflanzen aufgenommenen Mengen an Wirksubstanzen ergab, dass diese auf dem leichten Sandboden des Standortes Thyrow höher waren (bis zu 1 % des applizierten Lindans bzw. 0,4 % des applizierten Methoxychlors) als die aus der Löß-Schwarzerde des Standortes Bad Lauchstädt (maximal 0,2% des applizierten Lindans bzw. 0,09 % des applizierten Methoxychlors). Die Konzentration der beiden Organochlorpestizide in der Gesamtpflanze korrelierte streng positiv mit der Applikationsmenge (10, 50, 100, 400 mg/kg Boden) dieser Stoffe (Lindan: r²=0,93; Methoxychlor: r²=0,87). Dagegen belegt die aufgenommene Menge der beiden Substanzen pro Gefäß, daß deren Aufnahme durch Mais nur bis zu einer Applikationsmenge von 100 mg/kg anstieg, während bei 400 mg/kg ein Rückgang der aufgenommenen Menge an Organochlorpestiziden einhergehend mit einer gleichzeitigen Trockenmassedepression um 88 % durch Schädigung des Pflanzenwachstums zu beobachten war.

Aus der durch die Pflanzen aufgenommenen Menge an Organochlorpestiziden bezogen auf die dem Boden zu Versuchsbeginn applizierte Menge wurden Transferfaktoren errechnet, die das Konzentrationsverhältnis der Substanzen in Pflanze und Boden ausdrücken. Transferfaktoren kleiner 1 drücken aus, daß es nicht zu einem verstärkten Einbau und damit zu einer Akkumulation der jeweiligen Substanz in die Pflanze kommt (O'CONNOR et al. 1990a, O'CONNOR et al. 1990b, O'CONNOR et al. 1991). Die mittleren Transferfaktoren der beiden Pestizide vom Boden in die Pflanze belegen, dass es in den oberirdischen Pflanzenteilen (Transferfaktoren << 1) nicht zu einer Anreicherung der Stoffe kam. Im Boden mit dem geringsten Corg-Gehalt wurde für Lindan aufgrund seiner hohen Pflanzenverfügbarkeit ein Transferfaktor von 1,53 errechnet.

15.3 Einfluss von Applikationsdosis und -form auf Rückstände von Pestiziden in Boden und Pflanze

Im Rahmen der Dissertation "Untersuchungen zur Aufnahme von ausgewählten Pestiziden durch Pflanzen sowie ihre Rückstände im Boden" (QUARTA 2000) wurde die Aufnahme von PSM durch Pflanzen sowie PSM – Rückstände im Boden in Abhängigkeit von Bodenart, Applikationsform und –dosis untersucht. Darüber hinaus sollte untersucht werden, ob ein Transport von PSM nach Blattapplikation innerhalb der Pflanze bis zum Boden hin erfolgen kann. Dazu wurden Gefäßversuche mit Böden der Standorte Bad Lauchstädt (Löß-Schwarzerde) und Müncheberg

(Sand-Braunerde) (Tab. 15.2) durchgeführt. Als Versuchspflanzen wurden Mais und Ackerbohnen verwendet. Als Herbizide wurden Dichlofop-methyl (Ackerbohnen) bzw. Terbuthylazin (Mais) sowie für beide Fruchtarten Cypermethrin als Insektizid in der vom Hersteller empfohlenen sowie der 10-fachen Dosis als Boden- und Blattapplikation verabreicht.

Tab. 15.2) Bodenchemische und - physikalische Parameter der Versuchsböden

Bodenart	KAK *)	pH-Wert	Ton	Sand	C_{org}	Nt	C/N	
	(mval/100g		(%)	(%)	(%)	(%)		
	Boden)							
Löß-Schwarzerde	28,6	6,8	22	8	2,15	0,198	10,9	
Sand-Braunerde	10,7	5,0	4	71	1,16	0,120	9,7	

^{*} KAK - Kationenaustauschkapazität

Die Ergebnisse der Untersuchungen ließen folgende Aussagen zu:

Bei Ackerbohnen führte Cypermethrin und Diclofop-methyl zu einer deutlichen Steigerung des Ertrages und der N-Aufnahme. Im Gegensatz dazu verringerte sich bei *Mais* die N-Aufnahme bei allen mit Cypermethrin behandelten Gefäßen. Unabhängig von der Applikationsart fanden sich Rückstände von Cypermethrin, Diclofop-methyl und Terbuthylazin in den Ackerbohnen und im Mais. Die Höhe der Rückstandsmengen war von der Applikationsdosis abhängig. Die Cypermethrinkonzentrationen lagen nach der Blattapplikation auch bei empfohlener Dosis bei beiden Fruchtarten in allen Pflanzenteilen oberhalb der für Deutschland zugelassenen Höchstmenge von 0,05 mg/kg. Bei Anwendung von Diclofop-methyl und Terbuthylazin als Blattapplikation für Ackerbohnen und Mais waren deren Rückstände nur in den generativen Pflanzenteilen (Schoten bzw. Kolben) unterhalb der zulässigen Höchstmenge. Bei Nutzung der Kulturen als Grünfutter ist daher auch bei sachgemäßer Anwendung dieser Herbizide die Einhaltung der zulässigen Höchstmenge von 0,1 mg/kg nicht möglich. Die Kontamination des Bodens bei der Unkrautbekämpfung in Maisbeständen führte bei empfohlener Applikationsdosis nicht zu einer Belastung des Erntegutes. Bei Cypermethrin ist dies in den Ackerbohnenbeständen nicht auszuschließen.

Der Einfluss der Bodenart auf die Aufnahme von organischen Fremdstoffen zeigte sich in allen Experimenten, wobei deren Aufnahme durch die Pflanze in Löß-Schwarzerde geringer war als in Sand-Braunerde. Dies ist auf eine geringere Verfügbarkeit der Wirkstoffe aufgrund der höheren Sorption in tonreichen Böden zurückzuführen. In einem speziellen Versuch (Sand-Braunerde) mit Mais und Ackerbohnen wurden Terbuthylazin, Diclofop-methyl und Cypermethrin modellhaft in

100-facher Menge als Blattapplikation angewendet und der Transport der Wirkstoffe zu anderen Pflanzenteilen sowie letztlich zum Boden untersucht.

Es konnte gezeigt werden, daß bereits zwei Tage nach Behandlung ausschließlich der oberirdischen Pflanzenteile Wirkstoffrückstände in den Pflanzenwurzeln nachweisbar waren, die beiden Wirkstoffe demnach sehr schnell in die Wurzel verlagert wurden. Der signifikante Anstieg der Wirkstoffrückstände in den Wurzeln von der ersten (2 Tage nach Applikation) zur zweiten Probenahme (22 Tage nach Applikation) belegt, daß die Wirksubstanzen während des Wachstums der beiden Pflanzenarten zu den Wurzeln verlagert und in den Boden ausgeschieden werden (Tab. 15.3).

Tab. 15.3)

Mittlere Rückstandsmengen (n = 3) von Cypermethrin (CPM), Diclofop-methyl (DCF) und Terbuthylazin (TBA) in ober- und unterirdischen Pflanzenteilen von Mais und Ackerbohnen sowie im Boden nach Blattapplikation in einem Gefäßversuch mit Sand-Braunerde

				Wirkstoffrückstände							
Pflanze	PSM	Aufwand-	Ernte	(mg/Gefäß)							
		menge	(Tage)		Pf	Boden	[s]				
		[mg/Gefäß]		Sproß	[s]	Wurzel	[s]				
	CPM	336,0	2	67,52	2,50	0,046	0,0021	6,98	0,46		
Acker-			22	39,73	0,74	0,870	0,0058	19,6	0,34		
Bohnen	DCF	456,8	2	264,94	7,24	0,031	0,0027	4,69	0,04		
			22	91,94	5,25	0,105	0,0029	12,86	0,62		
	CPM	336,0	2	79,62	1,57	0,007	0,0004	2,61	0,09		
Mais			22	32,14	1,32	0,285	0,0531	-10,86	0,04		
	TBA	308,7	2	202,46	1,53	0,002	0,0003	0,76	0,01		
			22	147,56	1,29	0,022	0,0016	4,15	0,27		

15.4 Einfluss von Pestiziden auf den Stoffhaushalt von Pflanzen

Im Rahmen der Dissertation "Einfluss von Pestiziden auf den Stoffhaushalt von Mais und Sommergerste in Abhängigkeit von Bodeneigenschaften" (BÖHME 2000) wurde untersucht, inwieweit die Wirksubstanzen Terbuthylazin sowie Methoxychlor einen Einfluss auf den Stoffhaushalt, gemessen am Wasserhaushalt, Trockenmasseertrag und Stickstoffhaushalt von Mais und Sommergerste in Abhängigkeit von der Bodenart (Löß-Schwarzerde, Sand-Braunerde, Tab. 15.2), der Vegetationszeit und der Pestizidaufwandmenge haben. Gleichzeitig wurden Aussagen zu Rückstandskonzentrationen der PSM in den Pflanzen sowie über die Menge und

Verteilung von Aminosäuregehalten der Pflanzen als Qualitätsmerkmale getroffen. HEINRICH (1998) berichtet bei Mais über steigende N-Entzüge durch steigende Konzentrationen an Organochlorpestiziden im Boden, wobei die Erhöhung der Wirkstoffkonzentration im Boden mit einer Erhöhung der N-Gehalte in der Wurzel korrelierte und mit einer Verzögerung der N-Verlagerung in den Sproß verbunden war. Neben einer Beeinflussung des N-Gehaltes einzelner pflanzlicher Organe fand QUARTA (2000) eine Erhöhung des Trockenmasseertrages bei Ackerbohnen, die mit den Wirkstoffen Cypermethrin und Diclofop-methyl behandelt wurden. Böhme (2000) konnte aus seinen Untersuchungen schlußfolgern:

Die Erfassung des Wasserbedarfs von Pflanzen ist eine geeignete Methode zur Identifikation stoffwechselbeeinflussender Prozesse. Überblicksmäßig kann Beginn, Dauer und Intensität des Wirkstoffeinflusses abgeleitet werden. Die Wasseraufnahme der beiden Pflanzenarten wird durch die PSM-Anwendung beeinflußt. Der Einfluß ist abhängig von der Bodenart, der Pflanzenart und deren Entwicklungsstadium. Die Trockenmassebildung und der N-Entzug von Mais und Sommergerste wurden ebenfalls in Abhängigkeit von Bodenart sowie Art und Aufwandmenge des Pestizides spezifisch beeinflußt. Bei Mais wurden auf Löß-Schwarzerde im Gegensatz zur Sand-Braunerde in den Pestizid-Varianten signifikant höhere Trockenmasseerträge im Vergleich zur Kontrolle festgestellt. Bei Sommergerste hingegen wurde auf Löß-Schwarzerde kein Einfluss der PSM festgestellt, jedoch kam es zu einer drastischen Verringerung der Trockenmasseerträge auf Sand-Braunerde. Generell zeigten Mais und Sommergerste eine deutlich differenzierte Reaktion auf die Anwendung von Methoxychlor. Mais wies eine größere Toleranz gegenüber diesem Insektizid auf als Sommergerste, wobei eine eher positive Beeinflussung von Trockenmasseertrag und N-Entzug eintrat. Die Empfindlichkeit von Sommergerste auf Methoxychlor war abhängig von der Bodenart, welche die Verfügbarkeit des Wirkstoffes bestimmt. Dies äußerte sich bei PSM-Anwendung in einer Verringerung sowohl des Wasserverbrauchs als auch der Trockenmassebildung und des N-Entzuges auf Sand-Braunerde. Generell wurde auf der Grundlage der PSM-Rückstandsuntersuchungen in den Pflanzen festgestellt, dass es bei Applikation der vom Hersteller empfohlenen PSM-Dosis nicht zu einer Überschreitung der vom Gesetzgeber zulässigen Grenzkonzentrationen kam.

Der Einfluss von Methoxychlor auf den Aminosäurepool sowie auf das Aminosäuremuster der oberirdischen Pflanzenteile von Mais und Sommergerste war abhängig vom Vegetationsstadium der Pflanzen, von der Aufwandmenge an PSM und der Bodenart. Methoxychlor erhöhte teilweise den Aminosäureanteil in der Ähre von Sommergerste auf Löß-Schwarzerde (Abb. 15.4). Asparaginsäure, Glutaminsäure, Prolin, Valin, Leucin und Phenylalanin wiesen einen deutlichen Anstieg im Gehalt bei den behandelten Varianten gegenüber der Kontrollvariante auf. Dieser Effekt

wurde auch bei Sand-Braunerde beobachtet (Tab. 15.4). Auf beiden Böden wurde der höchste Aminosäureanteil in den generativen Pflanzenteilen der Sommergerste bei empfohlener Dosis festgestellt. Diese Applikationsmenge von Methoxychlor ist damit als ein Optimum in Bezug auf eine Stimulierung der Aminosäurebiosynthese von Sommergerste anzusehen.

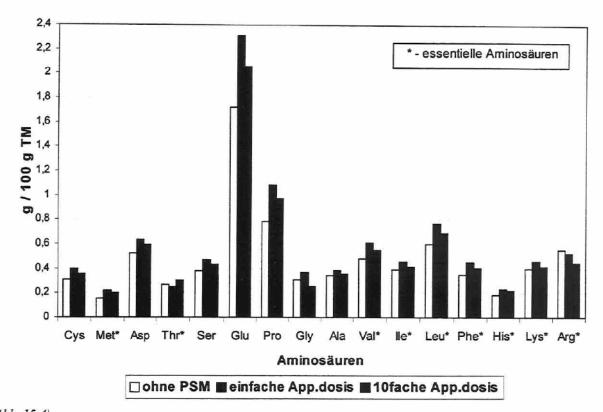


Abb. 15.4)
Einfluss von Methoxychlor auf den prozentualen Aminosäureanteil in Sommergerste-Ähren auf Löß-Schwarzerde nach 120 Tagen im Gefäßversuch

Bei Mais ließ sich ebenfalls feststellen, daß der Einfluß des Methoxychlor auf die prozentuale Zusammensetzung der pflanzlichen Aminosäurefraktion unabhängig von der Bodenart ist. Im Unterschied zur Ähre der Sommergerste kam es beim Maiskolben nicht zu einer Änderung im Aminosäureanteil der Varianten (Tab 15.4). Die Anwendung von Methoxychlor führte im Gefäßversuch nicht zu einer negativen Beeinflussung des pflanzlichen Aminosäurepools. In Abhängigkeit von der Pflanzenart kam es teilweise zu einem Anstieg des Gehaltes einzelner, z.T. essentieller Aminosäuren. Die Wirkung des PSM auf den Aminosäureanteil in der Pflanze war von der Bodenart unabhängig. Eine bevorzugte Synthese bestimmter Aminosäuren unter PSM-Einfluss wurde nicht beobachtet. Im Vergleich zu nicht PSM-behandelten Pflanzen kam es bei beiden Pflanzenarten zu keiner negativen Beeinflussung des Aminosäurepools. Es wurde allerdings häufig ein erhöhter Prolingehalt festgestellt. Prolin wird verstärkt in Streßsituationen (Trockenheit, Frost, Salinität, N-Mangel oder -Überangebot) gebildet. Es konnte erstmals gezeigt werden, dass auch PSM derartige Streßreaktionen verursachen können.

Tab. 15.4)
Einfluss von Methoxychlor und der Bodenart (Löβ-Schwarzerde [LSE], Sand-Braunerde [SBE]) auf den Anteil ausgewählter Aminosäuren [g/100 g TM] von Sommergerste-Ähre und Mais-Kolben nach 120 Tagen im Gefäβversuch

Pflanze	Boden	Appl. Dosis	Asp	Glu	Pro	Val*	Ile*	Leu*	Phe*	Lys*	Arg*
		ohne	0,52	1,72	0,78	0,48	0,39	0,60	0,35	0,40	0,55
	LSE	einfach	0,64	2,31	1,09	0,61	0,46	0,76	0,45	0,46	0,52
Sommer-		10fach	0,60	2,06	0,97	0,55	0,42	0,69	0,41	0,42	0,45
gerste		ohne	1,12	3,61	1,75	0,79	0,63	1,05	0,72	0,65	0,75
Ähre	SBE	einfach	1,21	4,57	2,21	0,88	0,69	1,21	0,88	0,73	0,87
		10fach	1,02	3,38	1,66	0,77	0,62	0,98	0,70	0,61	0,68
		ohne	0,53	1,17	0,62	0,43	0,32	0,74	0,27	0,34	0,31
	LSE	einfach	0,50	1,09	0,56	0,43	0,32	0,70	0,27	0,31	0,30
Mais-		10fach	0,47	1,07	0,54	0,40	0,30	0,68	0,24	0,28	0,28
Kolben		ohne	1,54	1,64	0,44	0,51	0,40	0,74	0,32	0,58	0,43
	SBE	einfach	1,47	1,64	0,54	0,51	0,40	0,73	0,36	0,59	0,43
		10fach	1,49	1,72	0,65	0,54	0,40	0,87	0,39	0,56	0,43

15.5 Abschätzung der Bioverfügbarkeit von organischen Fremdstoffen für deren Aufnahme durch Pflanzen

Neben den stofflichen Eigenschaften selbst wird die Verfügbarkeit der Substanzen u.a. entscheidend durch die Bodenart (Tongehalt), durch den Gehalt der Böden an organischer Substanz (SCHULZ 1999) und damit auch über die bodenmikrobiellen Aktivitäten beeinflusst. Für die Untersuchungen zur Abschätzung der Verfügbarkeit der Organochlorpestizide Lindan und Methoxychlor für deren Aufnahme durch Pflanzen wurde ein Gefäßversuch (HEINRICH 1998) genutzt, der einjährig für Untersuchungen zum Boden-Pflanze-Transfer dieser Pestizide in Abhängigkeit von der Bodenart und dem Gehalt an organischem Kohlenstoff angelegt wurde. Die Abtrennung einer leicht umsetzbaren Fraktion der OBS erfolgte durch eine Heißwasserextraktion (SCHULZ 1990). Die heißwasserextrahierbare Fraktion der OBS, charakterisiert durch deren C-Gehalt (Chwe) kann als der am leichtesten umsetzbare Teil der aktiven organischen Substanz angesehen werden (SCHULZ 1997) und wurde als ein mögliches Kriterium der Beurteilung von Schadstoffverfügbarkeiten im Boden herangezogen (SCHULZ 1999). Es zeigt sich ein deutlicher Einfluß sowohl des organischen Kohlenstoffgehaltes der Böden wie auch der Bodenart auf den Gehalt der beiden Pestizide in der Heißwasserfraktion (HWF) (Abb. 15.5).

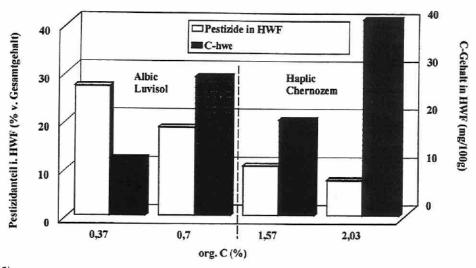


Abb. 15.5)
Einfluss des C_{org} -Gehaltes des Bodens sowie des C-Gehaltes in der Heißwasserfraktion (C_{hwe}) auf den Anteil von Pestiziden in der Heißwasserextrahierbaren Bodenfraktion (HWF)

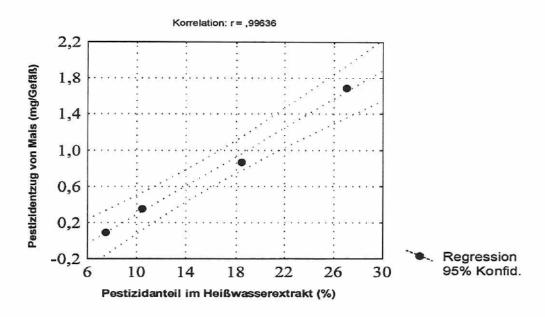


Abb. 15.6)
Beziehungen zwischen dem Pestizidanteil (Summe Lindan und MOC) in der heißwasserextrahierbaren
Fraktion der OBS und deren Aufnahme durch Mais im Gefäßversuch

Der Pestizidgehalt in dieser Fraktion wird mit steigendem organischen C-Gehalt des Bodens stark verringert und damit auch deren Verfügbarkeit zur Pflanzenaufnahme. Der experimentelle Nachweis wird aus den vorliegenden Ergebnissen (Abb. 15.6) sichtbar. Für die Beziehung zwischen der Aufnahme der Pestizide durch Mais und dem Pestizidanteil in der heißwasserextrahierbaren Fraktion der OBS, einer definitionsgemäß leicht umsetzbaren Bodenfraktion, ergibt sich eine noch engere Korrelation von r²= 0,99. Entsprechend der stofflichen Eigenschaften der Substanzen ist im Vergleich zu MOC ein größerer Anteil des besser wasserlöslichen Lindans in der

Heißwasserfraktion enthalten. Die Verringerung der Verfügbarkeit eines Stoffes in der Bodenlösung bzw. der Anteile, die an leicht umsetzbare Teile der OBS gebunden sind, bedeutet Immobilisierung durch z.B. Sorptionsprozesse bzw. Wechselwirkungen mit stabileren Fraktionen der OBS. Zur Untersuchung dieser Wechselwirkungen wurde eine physikalische Fraktionierung der Böden nach Korngrößen- und Dichteunterschieden (SHAYMUKHAMETOV et al. 1984, TRAVNIKOVA et al. 1990) vorgenommen. Diese Fraktionierung lieferte zwei grundsätzlich verschiedene Pools der OBS:

- a) eine OBS-Fraktion, die sehr enge Bindungen zu den Tonmineralien aufweist und somit physikalisch stabilisiert ist (OMK – organomineralische Komplexe oder Assoziate) und
- b) spezifisch leichte Fraktionen der OBS, die nur relativ lockere Wechselwirkungen mit dem Mineralkörper des Bodens aufweisen, physikalisch wenig stabilisiert sind und eine unterschiedliche chemische Stabilität haben können.

Die Quantifizierung der beiden Organochlorpestizide in den Fraktionen ergaben für Methoxychlor höhere Anreicherungsfaktoren in der Tonfraktion als für das besser wasserlösliche Lindan. Bezogen auf den Gesamtgehalt von Methoxychlor wurde in der Tonfraktion nahezu das Zehnfache gefunden (Abb. 15.7). Die Affinität zur Bindung an die Tonfraktion zeigt sich besonders deutlich in der Tieflehm-Fahlerde vom Standort Thyrow, wobei hier zusätzlich der Einfluss des TOC sichtbar wird (SCHULZ 1999).

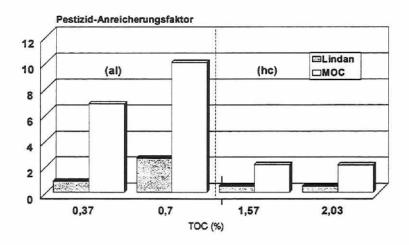


Abb. 15.7)

Einfluss der Bodenart und des TOC des Bodens auf die Anreicherungsfaktoren von Lindan und Methoxychlor (MOC) in der Tonfraktion einer Löß-Schwarzerde (haplic chernozem – hc) und einer Tieflehm-Fahlerde (albic luvisol – al)

15.6 Eintrag von PAK über den Luftpfad in agrarisch und industriell genutzten Gebieten des Raumes Halle

Für die Stoffgruppe der PAK ist vor allem der direkte atmogene Eintrag auf Blätter und Sproß von Bedeutung, wohingegen eine Pflanzenaufnahme über den Wurzelkörper kaum stattfindet (SIMS & OVERCASH 1983). Der Beitrag von Pflanzen als intermediäre Schadstoffsenke ist noch weitgehend unbekannt (SIMONICH & HITES 1994); ihr Beitrag spiegelt sich vor allem in Waldböden wieder, die durch ihre Humusauflage im Vergleich zu Standorten mit weniger Vegetation höhere PAK-Gehalte aufweisen (MATZNER 1984). Im Falle der Kulturpflanzen können PAK durch atmosphärische Deposition auf Pflanzenoberflächen (Blätter und Früchte) in die Nahrungskette gelangen.

Eine Erfassung der Belastung von Böden und Pflanzen durch luftgetragene Schadstoffe ist über Depositionsmessungen möglich. Hier bestehen noch große Forschungsdefizite. Bisherige Untersuchungen zu Standortbelastungen beschränken sich meist Immissionsmessungen oder Boden- bzw. Sedimentbelastungen. Vergleichende Untersuchungen über PAK-Gehalte in verschiedenen Umweltmedien am gleichen Untersuchungsstandort sind dem Bereich der Forschung zu Depositionsmechanismen zuzuordnen und behandeln meist Verteilungsgleichgewichte zwischen den Systemen Luft-Boden bzw. Luft-Pflanze (TOLLS & MCLACHLAN 1994; SIMONICH & HITES 1994). Im Rahmen der Dissertation "Untersuchungen zum Eintrag von polycyclischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK) über den Luftpfad in ländlichen Gebieten des Raumes Halle/Saale" (SCHÄFER 1997) wurde für die Stoffgruppe der PAK am Untersuchungsstandort Bad Lauchstädt der Stofftransport Luft-Boden bzw. Luft-Pflanze charakterisiert. Der Standort am Rande des industriellen Ballungszentrums Halle-Leipzig-Bitterfeld repräsentiert einen ländlichen Raum mit einer zu diesem Zeitpunkt noch Immissionssituation (Braunkohlehausbrand). Durch Messung der typischen Immissionskonzentration mittels Aktivsammlern sowie der atmosphärischen Deposition über zwei unterschiedliche Passivsammler (Boden und Pflanze) wurden Zusammenhänge zwischen den PAK-Gehalten in den verschiedenen Umweltmedien sowie die jährliche Durchschnittsdeposition auf Boden und Pflanze untersucht. Die Immissionskonzentrationen sind jahreszeitlichen Schwankungen unterworfen. Im Winterhalbjahr während der Heizperiode waren diese deutlich höher (6 bis 10 mal so hoch) als im Sommerhalbjahr (durchschnittlich 4 ng·cm³). Das Konzentrationsprofil der PAK (Normalisierung der PAK-Konzentrationen auf Benz(e)pyren=1) zeigte sich im jahreszeitlichen Verlauf stabil. Das Winter-Immissionskonzentrationsprofil konnte eindeutig der Gruppe der Braunkohle-Hausbrand bedingten Immissionsprofile zugeordnet werden.

Ein Vergleich mit Immissionsprofilen aus der Region Weißenfels/Naumburg (Ministerium für Umwelt, Natur und Raumordnung – MUNR - SACHSEN/ANHALT 1994) ergab eine positive Korrelation (r> 0,7 bis 0,9) zu den einzelnen Vertretern der PAK. Die Anwesenheit eines Schwefelhomogen, des Benzo(b)naphtho-2,1-d-thiophen (2,1-BNT) in der Luft am Untersuchungsstandort ist ein zusätzlicher Indikator für Braunkohleverbrennung als Hauptemissionsquelle, da die Braunkohle im Umkreis stark schwefelhaltig ist.

Die atmosphärische Deposition wurde mittels Ober- bzw. Unterboden vom Standort sowie mit Grünkohlpflanzen als Passivsammler gemessen. Über eine Konzentrationsprofilanalyse der Boden- und Luftmessungen konnte gezeigt werden, daß die PAK proportional zu ihrem Anteil in der Luft in den Boden eingetragen werden und andere Kontaminationsquellen ausgeschlossen werden können. Die PAK-Konzentration im Oberboden ist sehr niedrig und befindet sich im Bereich der "natürlichen" Hintergrundbelastung. Vergleichbare Konzentrationen sind in ländlichen und als Reinluftgebiete ausgewiesenen Regionen Nordrhein-Westfalens zu finden. Die PAK-Aufnahme Pflanzenblätter der von Grünkohl war zwar proportional der Immissionskonzentration, das Konzentrationsprofil entsprach jedoch nur eingeschränkt dem Luftkonzentrationsprofil. Die PAK-Konzentration der Blätter war nach jeweils zweimonatiger Exposition im Winter um den Faktor 30 höher als im Sommer (Winter/Sommer-Verhältnis der Immissionskonzentration: 11). Die Pflanzen reagieren also sehr empfindlich auf Änderungen der Immissionsituation. Sie sind daher grundsätzlich für Depositionsuntersuchungen geeignet, wenngleich die Sammleroberfläche offenbar einen selektiven Beitrag zur PAK-Deposition leistet. Emissionsquellen lassen sich deshalb nicht unbedingt identifizieren.

Über einen Zeitraum von 2,5 Jahren wurde der PAK-Konzentrationsverlauf im Ober- und exponierten Unterboden verfolgt. Es wurde daraus eine jährliche PAK-Durchschnittsdeposition im Boden von ca. 11 μg/ kg · a bzw. 1,5 g/ ha · a berechnet.

UFZ-Bericht

Einfluß der Landnutzung auf Landschaftshaushalt und Biodiversität in agrarisch dominierten Räumen

Heidrun Mühle (Hrsg.)