

# Anorganische Schadstoffe im Boden; Beurteilung - Massnahmen

Satish K. GUPTA, Markus HÄMMANN, Thomas HARI, Thomas HERREN, Rosmarie HORT, Jean PAUL, Roland RAMMELT, Brigitte SCHÜPBACH und Kathrin WENGER, Eidgenössische Forschungsanstalt für Agrarökologie und Landbau (FAL), Institut für Umweltschutz und Landwirtschaft (IUL), Liebefeld, CH-3003 Bern

**In der Schweiz sind über 10'000 Hektaren Boden mit einem oder mehreren anorganischen Schadstoffen belastet. Bei solchen belasteten Böden ist die Bodenfruchtbarkeit beeinträchtigt und eine Gefährdung für Menschen, Tiere und Pflanzen ist möglich. Am IUL in der Gruppe «Anorganische Schadstoffe» befassen wir uns mit der Analytik und der Beurteilung von Bodenbelastungen sowie mit Massnahmen, um diese Gefährdungen abzuwenden. Es werden sanfte Bodensanierungsmassnahmen entwickelt, um die Böden *in situ* zu dekontaminieren.**

Während der letzten hundert Jahre wurden Luft, Wasser und Boden zum Teil in erheblichem Masse mit anorganischen Schadstoffen verunreinigt. In landwirtschaftliche Böden gelangen sie vorwiegend in Form von Klärschlamm, Handelsdünger oder Kompost. Entlang stark befahrener Strassen oder in der Umgebung von Industrieanlagen führen atmosphärische Schadstoffeinträge zu Bodenbelastungen (von Steiger und Baccini 1990; Meyer 1991). Im Oberboden werden anorganische Schadstoffe zu einem grossen Teil gespeichert und angereichert, da sie biologisch nicht abbaubar sind und an Tonmineralien und an die organische Substanz festgelegt werden. Das Bodenökosystem und damit die Bodenfruchtbarkeit werden dadurch langfristig gefährdet. Je nach Bodeneigenschaften können kleinere oder grössere Anteile der im Boden akkumulierten Schadstoffe mobilisiert, ins Grundwasser ausgewaschen oder durch Pflanzen aufgenommen werden. Schadstoffe im Boden sind auch eine Gefahr für Kinder, die Bodenpartikel beim Spielen im Freien oral aufnehmen.

Im Jahr 1983 wurde in der Schweiz der vorsorgliche Bodenschutz in der Umweltschutzgesetzgebung (USG 1983) verankert und in der Verordnung über Schadstoffe im Boden (VSBo 1986) konkretisiert. Ziel war es, den Boden vor weiteren Schadstoffeinträgen zu schützen. Es stand aber bis heute kein rechtliches Instrument zur Verfügung, um bei bereits belasteten Böden die notwendigen Massnahmen einzuleiten. Mit der Revision des Umweltschutzgesetzes (USGrev 1995) wurde dies nachgeholt. Die Konkretisierung erfolgt in einer neuen Verordnung über die Beurteilung von Bodenbelastungen des Bodens (VBBo 1997), welche die VSBo von 1986 ersetzen wird.

Unsere Arbeit steht in direktem Zusammenhang mit den gesetzlichen Aufgaben im Bereich des Bodenschutzes. Wir verbessern existierende Extraktionsverfahren und Analysemethoden, um die Gehalte verschiedener anorganischer Schadstoffe, vor allem Schwermetalle, zu bestimmen und beurteilen die Bodenbelastungen im Hinblick auf die Bodenfruchtbarkeit und die Gefährdung von Menschen, Tieren und Pflanzen sowie die Entwicklung von geeigneten Massnahmen zur Gefährdungsabweisung.

## Probenahme und Analytik

Wird auf einer Fläche eine Bodenbelastung vermutet, so müssen Bodenproben entnommen und untersucht werden. Die Methodik für die Probenahme, -aufbereitung und die Analytik sind in der VBBo sowie in verschiedenen Empfehlungen des Bundes festgehalten (BUWAL und FAC 1987; FAL, RAC, FAW 1996). Dadurch wird gewährleistet, dass die Ermittlung der Schadstoffgehalte in der ganzen Schweiz einheitlich erfolgt.

**Probenahme und -aufbereitung:** Wegen der Inhomogenität des Bodens wird für die Bestimmung des Schwermetallgehaltes mit Mischproben gearbeitet. Dazu werden auf einer zu beprobenden Fläche gleichmässig verteilt Einzelproben entnommen und zu einer Mischprobe vereint. Anschliessend werden die Proben bei 40°C bis zur Gewichtskonstanz getrocknet und dann gesiebt.

Um die Schwermetallgehalte zu bestimmen, müssen die Proben extrahiert werden. Für die Beurteilung der ökotoxikologischen Relevanz einer Bodenbelastung werden sowohl die totalen als auch die

leicht löslichen und damit pflanzenverfügbaren Anteile an Schwermetallen extrahiert. Beim Totalaufschluss werden die Schwermetalle mit 2-molarer Salpetersäure ( $\text{HNO}_3$ ) extrahiert, wodurch etwa 60 bis 80 % der gesamthaft im Boden vorhandenen Schwermetalle in Lösung gehen (FAC 1989; Hu und Häni 1983). Man spricht deshalb auch vom pseudo-totalen Schwermetallgehalt des Bodens. Die löslichen Schwermetalle werden mittels einer 0,1-molaren Natriumnitratlösung ( $\text{NaNO}_3$ ) extrahiert. In verschiedenen Gefäss-, Kleinparzellen- und Feldversuchen wurde für diesen Extrakt ein Zusammenhang zwischen dem Schwermetallgehalt des Bodens und verschiedener Kulturpflanzen nachgewiesen (Gupta *et al.* 1989).

**Analyse:** Für die quantitative Bestimmung der Schwermetalle in wässrigem Milieu stehen verschiedene analytische Methoden zur Verfügung. Dies sind hauptsächlich Atomabsorptionsspektroskopie (AAS), Induktiv-gekoppelte Plasma-Massenspektroskopie (ICP-MS) und Induktiv-gekoppelte Plasma-Atomemissionsspektroskopie (ICP-AES). Zurzeit entwickeln wir Methoden für Ionenchromatographie (IC).

Die zu analysierenden Extrakte haben eine komplexe stoffliche Zusammensetzung, weil bei der Extraktion nicht nur Schwermetalle, sondern auch andere Stoffe aus dem Bodenmaterial herausgelöst werden. Dies führt zu einer sehr hohen Salzkonzentration. Bei den meisten oben beschriebenen Analysegeräten beeinträchtigt diese die Messung. Eine Verdünnung der Proben bringt zwar eine Reduktion der Salzkonzentration, setzt aber auch die Schwermetallkonzentration in den Bereich der Nachweisgrenze herab.

Momentan entwickeln wir ein Verfahren, bei welchem mittels Einbinden (Chelation) die störenden Salze aus dem Extrakt entfernt und die Schwermetallkonzentration erhöht wird. Dadurch können im Boden tiefere Schwermetallgehalte besser nachgewiesen werden.

**Tab. 1. Richtwerte für anorganische Schadstoffe im Boden**

	Blei	Cad- mium	Chrom	Kupfer	Moly- bdän	Nickel	Queck- silber	Zink	Fluor
Totalgehalt mg/kg TS	50	0,8	50	40	5	50	0,5	150	700
Löslicher Gehalt mg/kg TS	-	0,02	-	0,7	-	0,2	-	0,5	20

gemäss Entwurf Verordnung über Beurteilung von Bodenbelastungen (VBBo 1997)

**Tab. 2. Prüfwerte für anorganische Schadstoffe im Boden**

Nutzungsart		Blei		Cadmium		Kupfer		Zink	
		T	L	T	L	T	L	T	L
Nahrungspflanzen	mg/kg TS	200	-	2	0,02	-	-	-	-
Futterpflanzen	mg/kg TS	200	-	2	0,02	150	0,7	700	1
Nutzung mit möglicher oraler Bodenaufnahme	mg/kg TS	300	-	10	-	-	-	-	-

gemäss Entwurf Verordnung über Beurteilung von Bodenbelastungen (VBBo 1997)  
T: Totalgehalt (2 Mol HNO<sub>3</sub>-Extrakt); L: Löslicher Gehalt (0,1 Mol NaNO<sub>3</sub>-Extrakt)

### Beurteilung der Schwermetallbelastungen im Boden

Sind die Schadstoffgehalte im Boden bestimmt, so muss ihr Gefährdungspotential beurteilt werden. Richtwerte für anorganische Schadstoffe existieren in der Schweiz seit 1986. Im Schweizer Bodenschutzrecht sind dazu Prüf- und Sanierungswerte für verschiedene anorganische Schadstoffe vorgesehen (VBBo 1997). Je nach Wert, der im Einzelfall überschritten wird, müssen von den Kantonen entsprechende Massnahmen getroffen werden (Abb. 1).

**Richtwerte:** Die Richtwerte sind Vorsorgewerte (Tab. 1). Sie geben ein Mass für die Schadstoffbelastung an, oberhalb derer die Bodenfruchtbarkeit langfristig nicht mehr gewährleistet ist. Für alle Arten von Böden und Nutzungen gelten dieselben Richtwerte. Je nach Schadstoff ist nur ein Richtwert für den Totalgehalt oder zusätzlich auch für den löslichen Gehalt definiert. Werden Richtwerte überschritten, so müssen die Kantone die Ursache der

Belastung ermitteln. Ist dies geschehen, so prüfen sie, ob die Vorschriften des Bundes in den Bereichen Luftreinhaltung, umweltgefährdende Stoffe und Gewässerschutz ausreichen, um einen weiteren Anstieg der Bodenbelastung zu verhindern. Genügen diese Massnahmen nicht, so treffen die Kantone weitergehende Massnahmen, wie zum Beispiel strengere Emissionsgrenzwerte für Industrieanlagen. Dieselben vorsorglichen Massnahmen werden auch ergriffen, wenn ein Richtwert noch nicht überschritten ist, aber ein deutlicher Anstieg des Schadstoffgehalts eines Bodens festgestellt werden kann.

**Prüfwerte:** Mit zunehmendem Schadstoffgehalt kann der Boden eine Gefahrenquelle für Menschen, Tiere oder Pflanzen sein. Die Schwelle zu einer solchen möglichen Gefährdung sind die Prüfwerte (Tab. 2). Werden diese überschritten, so untersuchen die Kantone den betreffenden Standort im Hinblick auf die vermutete Gefährdung (Vollmer und Gupta 1995; VBBo 1997). Ist eine solche vorhanden, so schränken die Kantone die Nutzung auf der be-

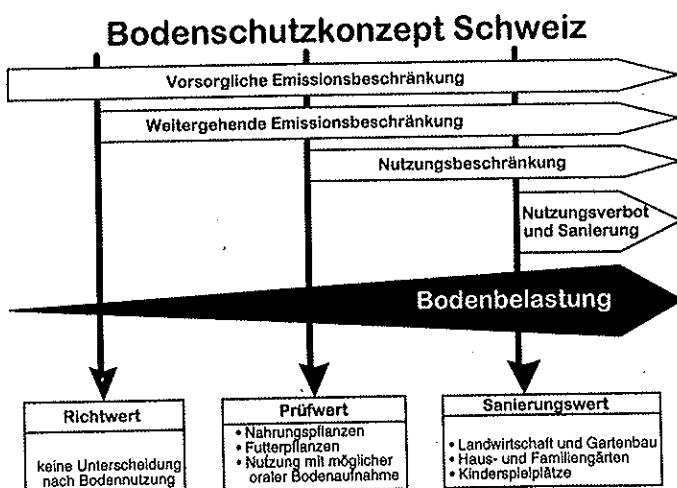
troffenen Fläche in dem Masse ein, dass die Gefährdung abgewiesen wird. Weil die Wirkungspfade und damit die Gefährdung für Menschen, Tiere und Pflanzen verschieden sind, werden Prüfwerte nach der Art der Nutzung unterschieden. In der VBBo sind folgende Nutzungsarten vorgesehen: Nahrungspflanzen, Futterpflanzen und Nutzung mit möglicher oraler Bodenaufnahme.

Die Gefährdungsabschätzung erfolgt verschieden, je nachdem welcher Prüfwert überschritten worden ist. Auch die gefährdungsabweisenden Massnahmen, die ergriffen werden müssen, hängen von der Art der Gefährdung ab:

■ **Prüfwert Nahrungspflanzen:** Ist der Prüfwert Nahrungspflanzen überschritten, wird die Qualität der Nahrungspflanzen untersucht. Als Bewertungskriterium werden die Toleranz- und Grenzwerte der Fremd- und Inhaltstoffverordnung (FIV 1995) verwendet. Sind diese überschritten, so wird der Anbau der entsprechenden Nahrungspflanze eingeschränkt.

■ **Prüfwert Futterpflanzen:** Ist der Prüfwert Futterpflanzen überschritten, wird die Qualität des angebauten Futtermittels untersucht und mit Hilfe der Höchstgehalte in der Futtermittelbuchverordnung (FMBV 1995) oder mit Handicap-Schwellen (Kessler 1993) bewertet. Wenn eine Gefährdung nachgewiesen ist, wird je nach Art der Bodenbelastung auf der betroffenen Fläche die Nutzung auf bestimmte Nutztierarten beschränkt.

■ **Prüfwert für Nutzungen mit möglicher oraler Bodenaufnahme:** Ist der Prüfwert für Nutzungen mit möglicher oraler Bodenaufnahme überschritten, so wird untersucht, ob spielende Kinder gefährdet sind. Dabei sind Faktoren wie der Grad der



**Abb. 1. Der stoffliche Bodenschutz in der Schweiz mit Richt-, Prüf- und Sanierungswerten sowie den Massnahmen, wenn die entsprechenden Werte überschritten werden.**

	Sanierungsmassnahmen (technisch)			Beschränkungs- massnahmen (administrativ)
	Sicherung	Dekontamination	Umlagerung	
Hart	<ul style="list-style-type: none"> <li>Versiegeln</li> <li>Verglasen</li> <li>Verdünnen</li> <li>Tiefpflügen</li> <li>Zugabe von unbelastetem Material</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Bodenwaschen</li> <li>Thermische Bodenbehandlung</li> <li>Elektromigration</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Doponierung</li> <li>Horizontale Umlagerung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Nutzungsverbot</li> <li>raumplanerische Umzonung</li> <li>Nutzungsänderung</li> <li>Nutzungsbeschränkung</li> </ul>
Sanft	<ul style="list-style-type: none"> <li>Immobilisierung</li> <li>Bindemittel</li> <li>Aufkalkung</li> <li>Phytostabilisierung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Phytoextraktion mit oder ohne Mobilisierung durch hyperakkumulierende Pflanzen oder durch ertragsrelevante Pflanzen</li> <li>Mikrobieller Schadstoffabbau</li> <li><i>in situ</i>-Ausschwemmung von Schadstoffen</li> </ul>		

**Abb. 2. Gefährdungsabweisende Massnahmen bei schadstoffbelasteten Böden.**

**Tab. 3. Sanierungswerte für anorganische Schadstoffe im Boden**

Nutzungskategorie		Blei		Cadmium		Kupfer		Zink	
		T	L	T	L	T	L	T	L
Landwirtschaft und Gartenbau	mg/kg TS	2000	-	30	0,1	1000	4	2000	5
Haus- und Familiengärten	mg/kg TS	1000	-	20	0,1	1000	4	2000	5
Kinderspielflächen	mg/kg TS	1000	-	20	-	-	-	-	-

gemäss Entwurf Verordnung über Beurteilung von Bodenbelastungen (VBBo 1997)  
 T: Totalgehalt (2 Mol HNO<sub>3</sub>-Extrakt); L: Löslicher Gehalt (0,1 Mol NaNO<sub>3</sub>-Extrakt)

vegetativen Bedeckung, die Häufigkeit der Nutzung durch Kinder sowie das Alter der spielenden Kinder von Bedeutung. Besteht eine Gefährdung, so werden Massnahmen verfügt, um diese zu beseitigen. So kann zum Beispiel auf einer Fläche, die vegetationsfrei ist, mit einer deckenden Grasschicht der direkte Bodenkontakt verringert werden.

**Sanierungswerte:** Sanierungswerte geben eine Belastung an, bei deren Überschreitung bestimmte Nutzungen ohne Gefährdung von Menschen, Tieren oder Pflanzen nicht mehr möglich sind (Tab. 3). In diesem Fall verbieten die Kantone die entsprechende Nutzung umgehend. In Gebieten mit raumplanerisch festgelegter gartenbaulicher, land- oder forstwirtschaftlicher Nutzung ordnen die Kantone zudem Massnahmen an, mit denen die Bodenbelastung soweit unter die Sanierungswerte gesenkt wird, dass die beabsichtigte Nutzung ohne Gefährdung von Menschen, Tieren oder Pflanzen möglich ist (USGrev 1995; VBBo 1997).

Sanierungswerte sind für folgende Nutzungen vorgesehen:

- ☒ Landwirtschaft und Gartenbau
- ☒ Haus- und Familiengärten
- ☒ Kinderspielflächen

### Massnahmen zur Gefährdungsabweisung

Für bereits belastete Standorte, wo eine vom Boden ausgehende Gefährdung für Mensch, Tier und Pflanze festgestellt wurde, müssen sinnvolle Massnahmen getroffen werden. Ziel einer Massnahme ist es, die Gefährdungen zu beseitigen oder zumindest zu vermindern. Solche Massnahmen können Nutzungseinschränkungen oder -verbote, aber auch technische Sanierungsmassnahmen sein (Abb. 2).

**Mögliche Sanierungsmassnahmen:** Bei den Sanierungsmassnahmen wird zwischen harten und sanften Massnahmen unterschieden. Als harte Massnahmen gelten Bodenbehandlungen, welche entweder zu einer starken Verminderung oder gar einem völligen Verlust der chemischen, physikalischen und besonders

biologischen Qualität des Bodens führen. Harte Sanierungsmassnahmen bedingen meist eine *ex situ*-Behandlung, das heisst, der Boden wird ausgekoffert und in einer Bodenreinigungsanlage dekontaminiert oder unter Umständen sogar deponiert. Als harte Massnahmen gelten zum Beispiel Bodenwaschung, Säureextraktion, Verbrennung, Bodenverglasung, Versiegelung und Bodenaustausch. Diese Verfahren sind meist mit grossen Kosten verbunden und eignen sich deshalb kaum für die Behandlung von grossflächig belasteten Böden.

Sanfte Massnahmen haben hingegen das Ziel, die die Bodenfruchtbarkeit bestimmenden Eigenschaften weitgehend intakt zu lassen oder wenn möglich wiederherzustellen. Sanfte Sanierungsmassnahmen werden *in situ* durchgeführt, das heisst, der Boden wird an Ort und Stelle belassen und in seiner Struktur möglichst nicht verändert.

Da nicht genügend unbelastete Kulturerde zur Rekultivierung belasteter Flächen vorhanden ist und auch der Deponieraum beschränkt ist, sind wo immer möglich sanfte Massnahmen den harten Sanierungen vorzuziehen. Bei den sanften Massnahmen wird zwischen Sicherungs- und Dekontaminationsmassnahmen unterschieden (Abb. 2).

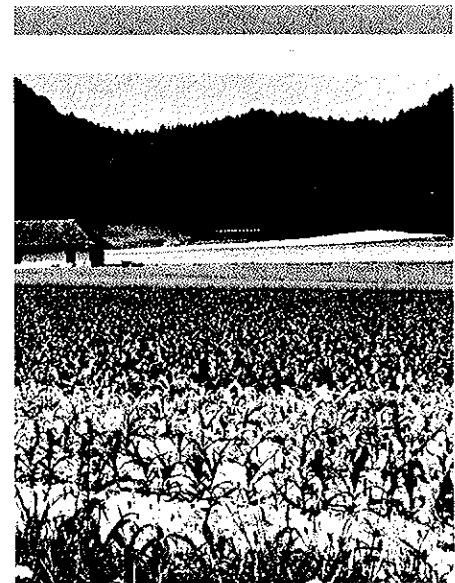
**Sicherungsmassnahmen:** Ziel der Sicherungsmassnahmen ist der Schutz der Kulturpflanzen sowie des Grundwassers vor einer zu hohen Belastung durch Schwermetalle (Abb. 3). Um dieses Ziel zu erreichen, müssen die löslichen Schwermetalle im Boden so festgelegt werden, dass sie nicht mehr pflanzenverfügbar sind. Einerseits kann dies durch eine Erhöhung des pH-Werts mittels Aufkalken erreicht werden, wodurch die Löslichkeit der Schwermetalle verringert wird. Andererseits können Schwermetalle auch durch eine Zugabe von tonmineralhaltigen Bindemitteln immobilisiert werden (Krebs 1996; Krebs und Gupta 1994). Die Zugabe von Bindemitteln darf aber nicht zu einer vollständigen Bindung aller Schwermetalle im Boden führen, da einige unter ihnen essentiell für das Pflanzenwachstum sind und somit

### Anorganische Schadstoffe und deren Wirkung

Zu den anorganischen Schadstoffen gehören alle Metalle sowie Metalloide und deren Verbindungen. Cadmium, Blei, Kupfer und Zink gehören zu den Schwermetallen, die in der Schweiz am meisten zu Bodenbelastungen beitragen. Die Wirkung von Schwermetallen sind bei Mensch, Tieren und Pflanzen verschieden.

Kupfer und Zink sind für Pflanzen lebensnotwendig. Bei höheren Gehalten im Boden wirken sie aber toxisch. Cadmium und Blei sind nicht sehr toxisch für Pflanzen, werden aber je nach Pflanze stark akkumuliert und beeinträchtigen damit die Qualität des Nahrungsmittels. Die äusseren Symptome von toxischen Auswirkungen der Schwermetalle bei Pflanzen, sind Verfärbungen der Blätter (Chlorosen), Kümmerwuchs oder Streszwachstum. Diesen Symptomen liegen biochemische Vorgänge wie die Anregung oder Störung von Enzymsystemen, die Bildung von freien Radikalen, sowie die Erhöhung der Permeabilität von Biomembranen zu Grunde. Einzelne Pflanzen haben verschiedene Abwehrmechanismen entwickelt. Einerseits kann die Schwermetallaufnahme durch komplexierende Ausscheidungen aus der Pflanzenwurzel vermindert werden. Andererseits können die Metalle auch in den Zellwänden festgelegt, oder durch Komplexierung und anschliessende Auslagerung der Komplexe aus dem Cytosol in die Zellvakuolen entfernt werden. Eine weitere Abwehrstrategie ist die vermehrte Bildung von schwermetallbindenden Polypeptiden wie zum Beispiel Phytochelatinen.

Bei Menschen und Tieren ist die Wirkung ebenfalls schwermetallspezifisch und hängt von der Art, Dauer und dem Ausmass der Exposition ab. Kupfer und Zink sind kaum toxisch. Überschüssiges wird durch den Körper ausgeschieden und führt daher nicht zu Schädigungen im Organismus. Lediglich für Wiederkäuer, vor allem Schafe, ist Kupfer bereits in relativ tiefen Konzentrationen toxisch. Blei und Cadmium gelangen vor allem über die Nahrung und die Atemwege (Cadmium vor allem bei RaucherInnen) in den Körper und werden vorwiegend in Leber und Niere sowie in den Knochen angereichert. Bei langjähriger oraler Aufnahme über den Magen-Darm-Trakt führt Cadmium zu Störungen der Nierenfunktion, zu Osteoporose sowie zu Störung des Kalziumstoffwechsels. Bei erhöhter Aufnahme von Blei vor allem bei Kindern kann dies innert Wochen zu Störungen verschiedener Organe und Organsysteme führen.



**Abb. 3. Die hohe Schwermetallbelastung tritt im Feld deutlich durch kümmerlichen Pflanzenwuchs und Verfärbungen der Blätter zum Vorschein.**

in ausreichendem Masse verfügbar sein sollten (siehe Kasten). Ebenso darf die Pflanzenverfügbarkeit von Nährkationen wie Kalium, Magnesium oder Kalzium nicht spürbar vermindert werden.

Durch Sicherungsmassnahmen wird der Totalgehalt an Schwermetallen im Boden nicht verändert. Es handelt sich dabei nicht um eine Sanierung im engeren Sinne, sondern lediglich um eine technische Massnahme zur Verringerung der Verfügbarkeit von Schwermetallen.

#### **Sanfte Dekontaminationsmassnahmen:**

Im Gegensatz zu den Sicherungsmassnahmen wird bei einer Bodendekontamination der Totalgehalt an Schwermetallen gesenkt. Bei sanften Verfahren werden die Schwermetalle mittels geeigneter Verfahren *in situ* dem Boden entzogen. Bei der Bodendekontamination geht es also nicht nur darum, die vom belasteten Boden ausgehende Gefahr abzuwenden, sondern um die Wiederherstellung der natürlichen Bodenverhältnisse. Bis heute sind allerdings noch keine Techniken zur sanften Bodendekontamination bis zur Felddauglichkeit entwickelt worden. Weltweit werden unterschiedliche Strategien zur sanften Bodendekontamination untersucht.

Eine Möglichkeit besteht darin, die Bodenfruchtbarkeit belasteter Böden mittels metallakkumulierender Pflanzen (Phytoextraktion) wiederherzustellen. Um genügend grosse Schwermetallmengen aus dem Boden zu extrahieren, braucht es Pflanzen, die neben einer ausgeprägten Schwermetallanreicherung in ihrem Gewebe auch eine grosse Biomassenproduktion aufweisen. Hyperakkumulatorpflanzen wie *Thlaspi caerulescens* (eine exotische Pflanze), *Alyssum murale*, *Salix viminalis* Korbweide und *Nicotiana tabacum* Tabak weisen zwar eine hohe Schwermetallaufnahme auf, bilden aber meist nur sehr wenig Biomasse (Ausnahme Tabak). Dagegen nehmen Pflanzen mit grosser Biomasseproduktion nur geringe Mengen von Schwermetallen auf. Im weiteren hängt die Aufnahme auch vom Schwermetall selbst und dessen Verfügbarkeit im Boden ab. Diese Einschränkungen wirken sich negativ auf die Dekontaminationszeiten aus. Heutige Schätzungen gehen von einigen Jahrzehnten bis zu mehreren Jahrhunderten aus, die nötig sind, um einen stark belasteten Boden zu dekontaminieren. Damit ist dieses Verfahren zum heutigen Zeitpunkt für eine praktische Anwendung noch nicht reif. Eine sanfte Bodendekontamination mittels Pflanzen ist nur dann realisierbar, wenn es gelingt,

neben der Selektion und Züchtung metallakkumulierender Varietäten ertragreicher Pflanzen auch geeignete Bodenbehandlungsmassnahmen zur Erhöhung der Schwermetallverfügbarkeit für Pflanzen zu entwickeln.

In Zusammenarbeit mit der AGB-Bioindikation und dem Institut für terrestrische Ökologie der ETH verfolgen wir die Strategie einer kontrollierten Mobilisierung, um den Schwermetallentzug durch ertragreiche Pflanzen zu steigern. Durch Einsatz von organischen Säuren beziehungsweise Komplexbildnern können Schwermetalle im Boden pflanzenverfügbar gemacht werden. Da die organischen Substanzen nach einer gewissen Zeit natürlicherweise abgebaut werden, erfolgt keine unerwünschte Anreicherung. Es besteht aber die Gefahr einer Metallauswaschung und damit einer Verlagerung in tiefere Bodenschichten. Deshalb müssen die Mobilisierungsmittel kontrolliert zugegeben werden. Darunter ist eine Anpassung Dosierung sowie Anwendungshäufigkeit der organischen Mobilisierungsmittel an die Schwermetallaufnahmefähigkeit der angewandten Pflanze zu verstehen (Wenger *et al.* 1996). Diese Arbeiten sind in das Integrierte Programm «Boden» innerhalb des Schwerpunktprogramms Umwelt des Schweizerischen Nationalfonds integriert. In diesem Programm werden auch die sozialen und ökonomischen Aspekte verschiedener sanfter Sanierungsverfahren untersucht. So muss zum Beispiel auch die Entsorgung der kontaminierten Pflanzen gelöst werden.

### **Ausblick**

In den letzten Jahrzehnten ist vor allem den anorganischen Schadstoffen in den Böden grosse Beachtung geschenkt worden. Die Verbesserung von Analysemethoden und die Entwicklung von Massnahmen zur sanften Sanierung von schwermetallbelasteten Böden ist wichtig für den Bodenschutz. Bisher wurde aber einer andern Stoffklasse wenig Beachtung geschenkt: den organischen Schadstoffen in Böden. Dies liegt einerseits an der aufwendigen und teuren Analytik, andererseits aber auch an der Unzahl von organischen Verbindungen, welche selektioniert und beurteilt werden müssen. Unter Mitwirkung kantonaler Bodenschutzfachstellen und dem Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft ist ein Projekt zur Beurteilung organischer Schadstoffe in Böden angelaufen. Das Ziel dieses Projekts ist, in

einem ersten Schritt ein Schema zu entwickeln, mit dessen Hilfe die bodenrelevanten organischen Schadstoffe identifiziert werden können. In einem zweiten Schritt wird das Gefährdungspotential dieser Stoffe im Boden für die Bodenfruchtbarkeit und die Gesundheit von Menschen, Tieren und Pflanzen abgeschätzt. Als Fallbeispiel werden die polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffe (PAK) näher betrachtet.

Mit dem revidierten Umweltschutzgesetz können zwar Bodenbelastungen gesetzlich beurteilt werden und wenn nötig Gefährdungsabweisende Massnahmen getroffen werden. Wichtigstes Instrument des stofflichen Bodenschutzes bleibt aber die Vorsorge. Nur wenn ein weiterer Eintrag von Schadstoffen in den Boden verhindert oder zumindest stark vermindert wird, sind unsere Böden eine Lebensgrundlage für die kommenden Generationen.

### **LITERATUR**

Das Literaturverzeichnis ist beim Erstautor erhältlich.

### **RÉSUMÉ**

#### **Micropolluants métalliques du sol: évaluation et mesures**

Plus de 10'000 hectares de terre sont pollués par des polluants inorganiques qui dépassent la valeur légalement tolérée. Ces fortes teneurs en polluants ont une influence défavorable sur la fertilité des sols et présentent un danger pour l'homme, la faune et la flore. Le groupe «Polluants inorganiques» de l'institut en protection de l'environnement et en agriculture de la FAL s'occupe de l'évaluation de ces pollutions et des procédures pratiques à utiliser pour leur assainissement. Des procédures d'assainissement *in situ* dites «douces», qui ne détruisent pas la structure du sol sont actuellement étudiées.

### **SUMMARY**

#### **Inorganic contaminants in soils: assessment and measures**

In Switzerland, more than 10'000 ha are contaminated by inorganic pollutants exceeding the guide values. Those high contents of pollutants in soil lead to a decrease of soil fertility and may pose a hazard to man, animals and plants. The group «Inorganic Contaminants» at the institute of environmental protection and agriculture of the FAL is involved in the analysis and the assessment of soil contamination as well as the measures to avert the hazards. The development of gentle *in situ* soil remediation measures, where soil structure is not altered, is an actual research topic.

**KEY WORDS:** soil contamination, heavy metals, assessment, remediation measures, gentle decontamination