

Bodensanierung durch Pflanzen: Möglichkeiten und Grenzen

Christoph D. LEUMANN, Roland RAMMELT und Satish Kumar GUPTA, Eidgenössische Forschungsanstalt für Agrikulturchemie und Umwelthygiene (FAC), CH-3097 Liebefeld-Bern

Die Sanierung von schwermetallbelasteten Böden stellt ein ungelöstes Problem dar, denn bis jetzt existieren keine umweltschonenden Verfahren, um die Schadstoffe aus dem Boden zu entfernen. Mit Hilfe von metallakkumulierenden Pflanzen könnte dies in Zukunft möglich werden. Allerdings müsste dazu die Schwermetallaufnahme der eingesetzten Pflanzen bedeutend gesteigert werden. Ein Projekt an der FAC Liebefeld erforscht die Möglichkeiten dieses sanften Sanierungsverfahrens.

Verschiedene landwirtschaftliche Böden der Schweiz sind durch Schwermetalleinträge aus der Vergangenheit in einem Masse belastet, welches die Produktion von qualitativ hochwertigen, gesunden Nahrungsmitteln, ein Oberziel der schweizerischen Agrarpolitik (Siebter Landwirtschaftsbericht, 1992), in Frage stellt. Als Beispiele seien die Umgebung alter Kehrlichtverbrennungs- und Industrieanlagen, Flächen entlang vielbefahrener Strassen oder Gebiete mit intensiver Verwendung schadstoffhaltiger Pflanzendünger genannt. Auf gewissen stark belasteten Flächen kann selbst eine Gefährdung der menschlichen Gesundheit über die Nahrungskette nicht ausgeschlossen werden. Neben der weiteren Verringerung von Schadstoffeinträgen wird deshalb auch die Sanierung belasteter Böden zu einer zunehmend wichtigeren Aufgabe des Bodenschutzes.

Bodensanierung: ein ungelöstes Problem

In der Botschaft zur Revision des Umweltschutzgesetzes (USG_{rev}) heisst es: «Ziel einer Sanierung sind die Wiederherstellung gestörter Bodenfunktionen, die Abwendung gesundheitlicher Gefahren für Mensch und Tier, die Sicherung der Produktion schadstofffreier Nahrungsmittel, der Schutz des Grundwassers und ein ungestörtes Pflanzenwachstum» (Zitat USG_{rev} 1993). Diese hochgesteckten Ziele dürfen aber nicht darüber hinweg täuschen, dass zum heutigen Zeitpunkt keinerlei umweltschonende Verfahren zur Bodendekontamination, das heisst zur Entfernung der Schwermetalle aus dem Boden, existieren. Im allgemeinen muss daher auf eine Bodensanierung im eigent-

lichen Sinne verzichtet werden, und es können lediglich Massnahmen getroffen werden, die eine Gefährdung von Mensch, Tier und Pflanzen abweisen (Abb. 2).

Ein sanfter Sanierungsweg wird gesucht

Die heute anwendbaren harten Massnahmen zur Standortsanierung haben eine weitgehende Zerstörung der Bodenfruchtbarkeit zur Folge. Sie sind deshalb zumindest im Falle einer Belastung mittleren Ausmasses eine unverhältnismässige Massnahme. Zudem sind *ex-situ*-Verfahren, bei denen der Boden zur Bearbeitung ausgehoben werden muss, sehr aufwendig und teuer, so dass sie auf grösseren Flächen auch wirtschaftlich untragbar sind. Die Entwicklung von Verfahren zur sanften Bodensanierung, welche die Multi-

funktionalität des Bodens wieder herzustellen vermögen, ist daher ein wichtiges Forschungsziel. Die Anforderungen an eine sanfte Sanierung sind hoch: Durch das Verfahren dürfen die übrigen, noch intakten Bodenfunktionen nicht gestört werden. Eine sanfte Bodensanierung soll *in-situ* (an Ort und Stelle) durchführbar sein. Dadurch können nicht nur Kosten gespart werden, vor allem gilt es auch zu verhindern, dass durch Aushub und Wegtransport des Bodens sekundäre Umweltbelastungen grösseren Ausmasses entstehen. Hauptsächlich zwei Ansätze zur sanften Sanierung sind in den letzten Jahren ins Gespräch gekommen. In der *Agrarforschung* wurde bereits eine Einführung in diese Problematik gegeben (Krebs und Gupta 1994). Durch den damals beschriebenen Ansatz der Immobilisierung von Schwermetallen wird deren schädigende Wirkung durch Bindung an Tonminerale stark vermindert. Eine andere Stossrichtung verfolgt die sanfte Bodendekontamination durch schwermetallakkumulierende Pflanzen, welche auch Phytosanierung genannt wird: Durch einen kontrollierten Entzug der Schwerme-



Abb. 1. In Gefässversuchen wird die Schwermetallaufnahme metallakkumulierender Pflanzen auf unterschiedlich belasteten Böden untersucht.

talle aus dem Boden soll die Bodenfruchtbarkeit nachhaltig regeneriert werden.

Phytosanierung: Wunschtraum oder Realität?

Wesentlich für die Durchführbarkeit dieses Sanierungsansatzes ist selbstverständlich, dass Pflanzen gefunden werden, die dem Boden genügende Mengen an Schwermetallen entziehen können. Im Zentrum des Interesses stehen oft sogenannte hyperakkumulierende Pflanzen (z.B. verschiedene Arten der Gattung *Thlaspi*), welche bestimmte Schwermetalle wie Zink, Kupfer oder Nickel in starker Masse anreichern (Baker *et al.* 1994). Berechnungen der Dekontaminationszeiten, welche notwendig wären für die Sanierung eines mit Zink, Kupfer, Cadmium oder Blei belasteten Bodens mit mehrfacher Richtwertüberschreitung, bewegen sich allerdings in allen heute bekannten Fällen in der Grössenordnung von vielen Jahrzehnten bis zu mehreren Jahrhunderten, sie sind zum heutigen Zeitpunkt also eindeutig zu lang für eine praktische Anwendung (Rammelt *et al.* 1995).

Für eine Maximierung der Dekontaminationswirkung ist nicht die Konzentration, sondern der Entzug der Metalle aus dem Boden entscheidend. Aufgrund ihrer geringen Biomasseproduktion ist der Gesamtaustrag durch Hyperakkumulatoren oft kaum grösser als derjenige einer normalen Fruchtfolge von Kulturpflanzen. Durch besonders produktive Pflanzen wie Mais, Tabak, Raps, aber auch Riesenknöterich oder bestimmte Weidenarten kann in gewissen Fällen sogar ein grösserer Schwermetallentzug erreicht werden (Rammelt *et al.* 1995). Ein wesentlicher Vorteil solcher Pflanzen mit hoher Biomasseproduktion ist zudem die Möglichkeit, das Pflanzenmaterial zur Energiegewinnung zu nutzen.

Auf jeden Fall ist aber eine sanfte Bodendekontamination nur realisierbar, wenn es gelingt, den Schwermetallentzug durch Pflanzen deutlich zu steigern. Fortschritte in dieser Richtung sollen durch ein integriertes Forschungskonzept, dessen Elemente in Abbildung 3 dargestellt sind, erreicht werden. Durch Selektion von metallakkumulierenden Varietäten ertragsreicher Pflanzen kann deren Schwermetallaufnahme wesentlich erhöht werden (Haase 1988; Greger 1995). Ebenso wichtig sind aber auch geeignete Bodenbehandlungsmassnahmen. Im Rahmen unseres Forschungsprogramms werden

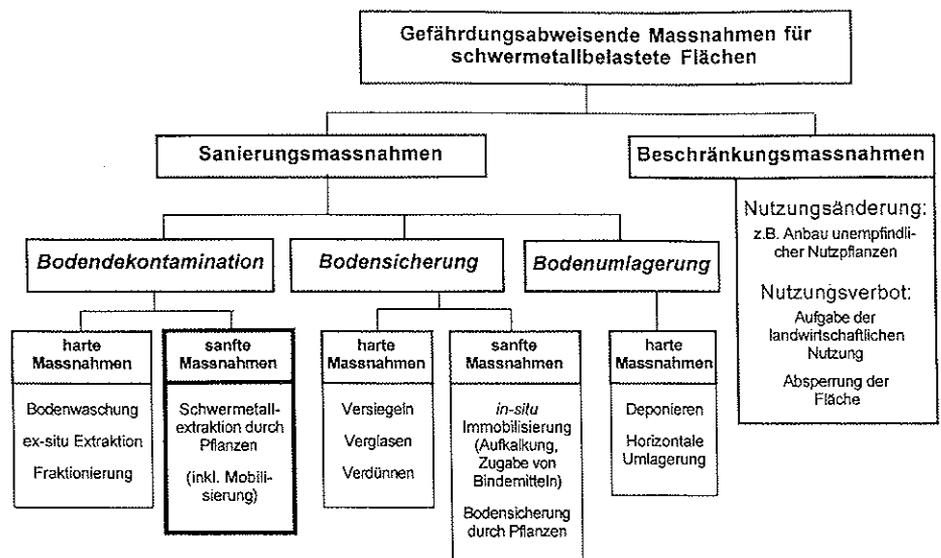


Abb. 2. Mögliche Massnahmen zum Umgang mit schwermetallbelasteten Flächen. Das Aufführen einzelner Massnahmen sagt nichts darüber aus, wieweit sie ökologisch sinnvoll, technisch anwendbar oder wirtschaftlich tragbar sind.

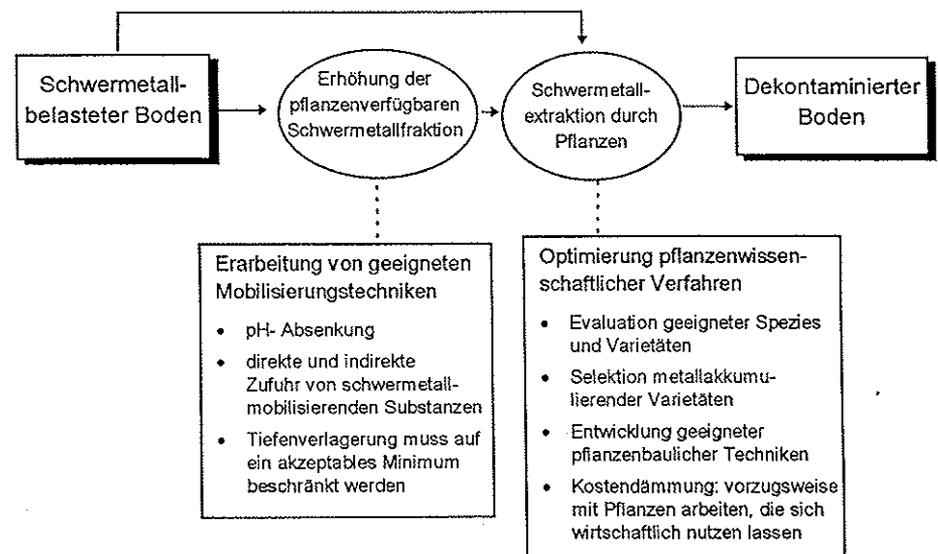


Abb. 3. Konzept für die Weiterentwicklung eines sanften *in-situ*-Dekontaminationsverfahrens mit Hilfe der Schwermetall-extraktion durch Pflanzen.

deshalb verschiedene Möglichkeiten untersucht, um die Schwermetalle durch eine Mobilisierung im Boden für die Pflanzen besser verfügbar zu machen.

Mobilisierung erhöht Schwermetallaufnahme

Die Aufnahme der Schwermetalle durch Pflanzen hängt in starkem Masse von den physikalischen und chemischen Bodenbedingungen ab. Ausschlaggebend ist nicht der Gesamtgehalt an Schwermetallen im Boden, sondern der leichtlösliche, mobile Anteil. Nur ein kleiner Teil der Schwermetalle liegt frei beweglich in der Bodenlösung vor, der grösste Teil ist an die

Bodenpartikel adsorbiert und für Pflanzen unerreichbar. Wie aus der Gegenüberstellung des löslichen Nickelgehaltes in verschiedenen belasteten Böden mit demjenigen in Pflanzen ersichtlich ist (Abb. 4), besteht eine deutliche Abhängigkeit der Schwermetallaufnahme durch Pflanzen vom löslichen Gehalt im Boden ($r^2 = 0,71$). Zwischen dem totalen Nickelgehalt und dem Gehalt in den Pflanzen besteht dagegen kein deutlicher Zusammenhang. Wesentliche Parameter, welche die Löslichkeit von Schwermetallen bestimmen und dabei Ansatzpunkte für eine gezielte Mobilisierung bieten, sind der pH-Wert und der Gehalt an Komplexbildnern im Boden.

Mehrfähriges Projekt an der FAC Liebefeld

Die Forschungsarbeiten zur Bodendekontamination mit Pflanzen laufen seit 1991 innerhalb des Nationalfondsprojekts zur sanften Bodensanierung (SPPU-Programm, Modul 6). Anfangs 1995 wurde eine Intensivierung der Forschungstätigkeit möglich im Rahmen eines fachspezifischen Beschäftigungsprogramms des BIGA und des KIGA des Kantons Bern. Für jeweils ein halbes Jahr können sich stellenlose Naturwissenschaftler und Naturwissenschaftlerinnen an den Forschungsarbeiten beteiligen, um so einen sinnvollen Beitrag zur Umweltforschung zu leisten und gleichzeitig ihre berufliche Qualifikation zu verbessern.

Abgeschlossene Arbeit:

- ausführliche Literaturstudie (herausgegeben als interner Bericht der FAC: Rammelt *et al.* 1995).

Laufende Arbeiten:

- Erarbeitung von Mobilisierungstechniken für die Schwermetalle im Boden: Laborversuche mit organischen Säuren und Komplexbildnern;
 - Analyse von organischen Säuren und Komplexbildnern im Boden mittels Ionenchromatographie;
 - Auswirkung der Schwermetallmobilisierung auf Akkumulation und Wachstum verschiedener Pflanzen: Gefäss- und Nährlösungsversuche;
 - Einfluss von Mykorrhiza auf die Schwermetallaufnahme durch Pflanzen: Literaturstudie;
- ### Geplante Arbeiten:
- Einsatzmöglichkeiten von Reststoffen zur Schwermetallmobilisierung;
 - Einfluss von mobilisierenden Substanzen auf die Tiefenverlagerung von Schwermetallen;
 - Eignung verschiedener Pflanzenanbausysteme zur Bodendekontamination und zur Produktion erneuerbarer Ressourcen; Stoff- und Energiebilanzen.

Durch Zusammenarbeit mit nationalen und internationalen Instituten sowie mit privaten Forschungsstellen soll ein koordiniertes Vorgehen im Sinne des integrierten Forschungskonzepts (Abb. 3) garantiert werden.

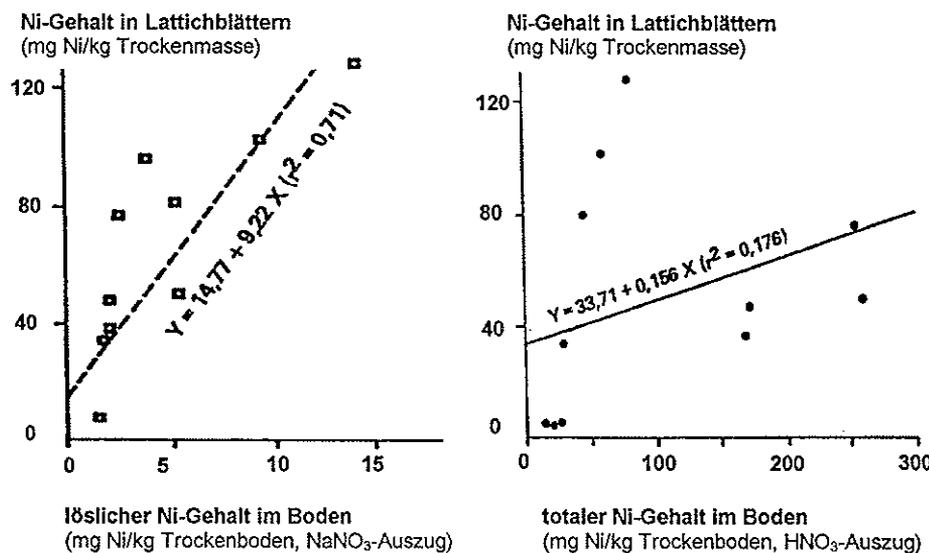


Abb. 4. Nickelaufnahme durch Lattich in Abhängigkeit des löslichen und des totalen Nickelgehalts im Boden.

Mobilisierung durch pH-Absenkung ...

Die Mobilisierung von Schwermetallen bei einer Absenkung des Boden-pH ist ausführlich dokumentiert worden (vgl. Gupta 1992; Herms und Brümmer 1980). Dadurch kann sich auch die Schwermetallaufnahme von Pflanzen um einen Fak-

tor zwei bis drei erhöhen (Hasselbach und Boguslawski 1991). Eine pH-Absenkung kann grundsätzlich durch Zugabe von Säuren in den Boden auf künstliche Weise herbeigeführt werden, falls dazu jedoch anorganische Säuren verwendet werden, reichern sich die entsprechenden Anionen (Nitrat, Chlorid, Sulfat) in einem untolerierbaren Masse an. Untersucht wird des-

halb, ob organische Säuren eingesetzt werden können, welche nach einer gewissen Zeit mikrobiologisch abgebaut werden, so dass der ursprüngliche Boden-pH wieder erreicht wird und keine Rückstände im Boden zurückbleiben. Aus bodenökologischen Überlegungen soll allerdings ein pH-Wert von 4,5 keinesfalls unterschritten werden.

... oder durch Komplexierung

Die starke Schwermetallmobilisierung durch Chelatbildner wie EDTA oder NTA ist ebenfalls schon länger bekannt (vgl. Wallace *et al.* 1974). Eigene Versuche in einem zinkbelasteten Boden aus Rafz (ZH) ergaben, dass bereits bei einer Konzentration von 1 mmol NTA/kg Boden eine Erhöhung des löslichen Zinkgehalts um Faktor 15 stattfindet. Es wurde auch gezeigt, dass durch die Zugabe von NTA in den Boden der Schwermetallentzug durch Pflanzen erhöht werden kann (Balmer und Kulli 1994; Wallace *et al.* 1974). Bei Versuchen mit EDTA wurde sogar eine Mehrakkumulationen von Blei bis zu Faktor 10 erreicht (Jørgensen 1993). Der Einsatz solcher synthetisch hergestellter Stoffe im Feld ist aus ökologischer Sicht allerdings fragwürdig, zumindest im Falle von kaum abbaubaren Substanzen wie EDTA. Vor einem allfälligen Einsatz im Rahmen von Bodensanierungsmassnahmen ist eine genaue Überprüfung der damit verbundenen Risiken unabdingbar, und vor allem sollen auch umweltschonendere Alternativen eingehend geprüft werden.

Bei allen Formen einer Schwermetallmobilisierung kann zudem das Problem auftreten, dass die Schadstoffe verstärkt in tiefere Bodenschichten verlagert werden. Dadurch kann auch die Gefahr einer Grundwasserverschmutzung zunehmen. Ein Mobilisierungsverfahren wird deshalb nur anwendbar sein, wenn es gelingt, diesen Effekt auf ein vernachlässigbares Minimum zu beschränken.

Bodeneigene Substanzen werden bevorzugt

Auch in natürlichen Böden finden sich Substanzen, welche mit den Schwermetallen Komplexe eingehen. Es handelt sich hier insbesondere um niedermolekulare organische Stoffe wie einfache aliphatische Carbonsäuren (Oxalsäure, Fumarsäure), Hydroxycarbonsäuren (z.B.

Zitronensäure, Weinsäure), aromatische Carbonsäuren (Salicylsäure, Phtalsäure, Protocatechusäure) sowie verschiedene Aminosäuren. Die Konzentration solcher Stoffe hängt in natürlichen Böden vom Gehalt an organischer Substanz und von der Mikroorganismenaktivität ab, sie können aber auch von Pflanzenwurzeln ausgeschieden werden (Schachtschabel *et al.* 1992). Zurzeit werden die Mobilisierungswirkung und die vom biologischen Abbau abhängige Wirkungsdynamik verschiedener bodeneigener Säuren und Komplexbildner getestet. Einige bis jetzt untersuchte Substanzen sind Zitronensäure, Oxalsäure und Salicylsäure, welche einerseits zu den stärksten Komplexbildnern unter den Carbonsäuren gehören, andererseits auch eine ausreichende Säurestärke haben, um den Boden-pH zu senken. Die mobilisierende Wirkung auf Zink konnte in einem belasteten Boden eindeutig nachgewiesen werden, allerdings ist die Wirkung bedeutend weniger stark als im Falle der erwähnten künstlichen Chelatbildner, so dass dem Boden bedeutend grössere Mengen beigegeben werden müssten. Aufgrund einer recht schnellen Abbauphase unter feldähnlichen Bodenbedingungen (wenige Tage bis Wochen, abhängig von der Konzentration) ist zudem der Einsatz dieser Carbonsäuren nur möglich, wenn für eine permanente Nachlieferung gesorgt werden kann.

Für den praktischen Einsatz kommen allerdings nicht nur Reinsubstanzen in Frage, sondern auch Substanzgemische, insbesondere Nebenprodukte der Nahrungs- und Futtermittelverarbeitung, welche durch mobilisierende Abbauprodukte charakterisiert sind. Eine weitere Möglichkeit stellt die Anregung der Produktion bodeneigener Substanzen durch mikrobiologische Methoden dar.

Weitere Bearbeitung des Pflanzenmaterials

Selbst wenn durch grosse Fortschritte in der Forschung eine beträchtliche Steigerung der Schwermetallaufnahme durch Pflanzen erreicht werden kann, gilt es auch noch verschiedene andere Probleme auf dem Weg zu einer ökologisch vertretbaren Bodendekontamination zu lösen. Nicht zu vergessen ist, dass auch die Pflanzen, welche mit Schwermetallen angereichert werden sollen, ihrerseits wieder auf sachgerechte Weise entsorgt wer-

den müssten. Im Falle einer Verbrennung biomassereicher Pflanzen - gegebenenfalls in Öfen mit spezieller Rauchgasreinigung - könnte bei dieser Behandlung gleichzeitig Energie aus erneuerbaren Ressourcen gewonnen werden. Dadurch könnte sich die wirtschaftliche Tragbarkeit eines solchen Verfahrens entscheidend verbessern. Im günstigsten Falle könnten am Ende die Schwermetalle aus den anfallenden Rückständen rezykliert werden. Falls dies jedoch aus technischen oder wirtschaftlichen Gründen nicht möglich ist, würden auch da wieder Abfälle entstehen. Aus der Welt schaffen lassen sich die Schadstoffe nicht, immerhin könnten sie aber in diesem Fall in konzentrierter und unschädlicher Form deponiert werden.

Kein Grund zu Sanierungs-Euphorie

Bei der ganzen Faszination, welche die Idee einer Bodensanierung durch Pflanzen ausübt, darf nicht vergessen werden, dass ein solches Verfahren auf jeden Fall ein kostenintensiver Prozess sein wird, der viele Jahre oder Jahrzehnte in Anspruch nimmt und dessen Anwendung auf kleinere Flächen beschränkt bleiben muss. Die Priorität, die dem vorbeugenden Bodenschutz im Sinne einer Verhinderung des Eintrags von Schadstoffen zukommt, versteht sich dadurch von selbst.

LITERATUR

Das Literaturverzeichnis ist beim Erstautor erhältlich.

RÉSUMÉ

Possibilités et limites de l'assainissement des sols contaminés à l'aide de plantes

L'assainissement des sols contaminés est un problème encore irrésolu, parce qu'il n'existe aucune technologie d'extraction des métaux lourds du sol sans porter à préjudice sa fertilité. L'utilisation de plantes accumulatrices de métaux lourds pourrait résoudre ce problème à l'avenir. Aujourd'hui cependant, le temps de décontamination serait beaucoup trop long pour une utilisation courante.

On développe des techniques de mobilisation des métaux lourds dans le sol afin d'augmenter l'absorption des contami-

nants par les plantes. Dans des expériences de laboratoire avec un sol contaminé en zinc, il est apparu que la fraction mobile de zinc augmente significativement lors d'un apport de NTA, agent chélatant dégradé biologiquement. Des effets semblables ont été observés également en présence de concentrations élevées de substances organiques telluriques comme l'acide citrique, oxalique ou salicylique. Les conséquences de cette mobilisation des métaux lourds sur l'absorption par les plantes sont étudiées dans des expériences en vases de végétation.

À l'avenir, la décontamination des sols avec des techniques douces restera cependant un processus long et coûteux. L'utilisation de plantes à haute productivité permet la production simultanée de ressources énergétiques, ce qui améliore le rendement économique du processus. La protection des sols se doit néanmoins de donner la priorité à des mesures visant à réduire la contamination à la source plutôt qu'à d'autres types d'assainissement de sols.

SUMMARY

Phytoextraction of heavy metals from soils: possibilities and limits

Soil decontamination remains a major problem, because up to now there is no technique to remove heavy metals from soil without harming its fertility. The use of metal-accumulating plants for soil clean-up is in discussion. However, the time needed for such a phytoremediation is too long for practical application today, and means to reach a higher heavy metal uptake by plants are being looked for.

Beside the choice of appropriate plant species, mobilisation of heavy metals in the soil is suggested as a way to increase plant uptake. Laboratory studies in zinc contaminated soils showed a significant increase of the mobile zinc fraction in the presence of the biodegradable chelating agent NTA. A similar effect was observed at a higher concentration of low-molecular-weight organic substances such as citric, oxalic and salicylic acid. The consequences of the heavy metal mobilisation for plant availability are being studied in pot experiments.

Even in the future phytoremediation of soils will remain a cost and time intensive treatment. The use of highly productive plants, that serve as a sustainable energy resource at the same time, might be a way to meet economic needs.

Still, the priority in soil protection should be given to a reduction of pollution rather than to any kind of soil remediation.

KEY WORDS: soil decontamination, phytoremediation, heavy metals, accumulation, plant availability, mobilisation