

Sanfte Sanierung schwermetallbelasteter Böden

Rolf KREBS und Satish Kumar GUPTA, Eidgenössische Forschungsanstalt für Agrikulturchemie und Umwelthygiene, Liebefeld (FAC), CH-3097 Bern

Für immer zahlreichere schwermetallbelastete Landwirtschaftsflächen müssen Massnahmen gefunden werden, um die Bodenfruchtbarkeit zu erhalten und die Schadstoffausbreitung zu verhindern. An der FAC Liebefeld wird der Eintrag von tonmineralhaltigen Bindemitteln zur Immobilisierung der Schwermetalle untersucht. Diese Methode wird in bezug auf Anwendbarkeit und Umweltverträglichkeit geprüft und soll in Zukunft die weitere landwirtschaftliche Nutzung der belasteten Böden ermöglichen.

Unter natürlichen Bedingungen treten die meisten Schwermetalle nur in sehr geringen Konzentrationen auf und gehören damit zu den Spurenelementen. Essentielle Spurenelemente wie Kupfer (Cu) und Zink (Zn) sind in niedrigen Konzentrationen lebensnotwendige Mikronährstoffe für pflanzliche und tierische Organismen. Bei hohen Konzentrationen aber haben diese Elemente eine toxische Wirkung. Nichtessentielle Spurenelemente wie Cadmium (Cd) und Blei (Pb) wirken auch in kleineren Konzentrationen lediglich schädlich (Geiger und Schulin 1992; Federer 1993).

Durch Abgase und Abwasser ergaben sich in den letzten hundert Jahren bedenkliche Schwermetallverunreinigungen in Luft, Wasser und Boden. In landwirtschaftliche Böden gelangen Schwermetalle vor allem in Form von Klärschlamm, Handelsdünger, Kompost oder atmosphärischen Einträgen (Von Steiger und Baccini 1990). Diese erhöhten Belastungen können Pflanzen (Abb. 1), Tiere und Menschen nachteilig beeinflussen. Die fortschreitende Belastung durch Schwermetalle ist sehr bedenklich und muss mit geeigneten präventiven Massnahmen verhindert werden.

Gelangen Schwermetalle in den Boden, werden sie dort zu einem grossen Teil gespeichert und angereichert, da sie nicht biologisch abbaubar sind und an der Bodenmatrix adsorbiert werden. Der Boden ist eine Senke für schwer und nicht abbaubare Stoffe (Meyer 1991). Die Schadstoffanreicherung bedeutet langfristig eine Gefahr für die Mikroorganismen im Boden (Stadelmann und Santschi-Fuhrmann 1987) und damit für die Bodenfruchtbarkeit. Je nach Bodeneigenschaften können

auch kleinere oder grössere Anteile der im Boden akkumulierten Schwermetalle mobilisiert, ins Grundwasser ausgewaschen oder durch Pflanzen aufgenommen werden (Brümmer *et al.* 1986). Die Mobilität und Pflanzenverfügbarkeit der Schwermetalle sind wichtige Faktoren zur Bestimmung des Risikos, das vom belasteten Boden ausgeht. In der Verordnung über Schadstoffe im Boden (VSBo 1986) sind Richtwerte für lösliche Schwermetallgehalte in Böden festgehalten. Diese stellen ein Mass für die Mobilität dar und ermöglichen die Einschätzung des vorhandenen Risikos. Untersuchungen der löslichen Schwermetallgehalte (NaNO_3 -Extraktion nach VSBo 1986) in Garten- und Landwirtschaftsböden der Schweiz ergaben kleinräumig massive Überschreitungen der gesetzlichen Richtwerte (FAC 1989).

In diesen Fällen muss mit einer erhöhten Schadstoffaufnahme durch Pflanzen oder der Auswaschung der Schwermetalle in tiefere Bodenschichten und in das Grundwasser gerechnet werden. Welche Massnahmen kommen in Frage, um diese Ausbreitung der Schadstoffe zu verhindern oder wenigstens einzuschränken? Je nach Ausmass und Art des vorhandenen Risikos gibt es verschiedene Möglichkeiten, einen Boden zu behandeln. Grundsätzlich ist festzuhalten, dass keine Sicherungs- und Sanierungsmassnahme die vollständige Wiederherstellung des ursprünglichen Zustands des Bodens erlaubt. Immer häufiger sind aber Böden mit Schwermetallen belastet und geeignete Massnahmen drängen sich auf. Ziel dieser Arbeit ist es, Wege zu neuen Massnahmen für schwermetallbelastete Garten- und Landwirtschaftsböden aufzuzeigen.

Schwermetalle: Bindung an Tonmineralien

Durch gezielte Zugabe von tonmineralhaltigen Bindemitteln zu belastetem Bo-

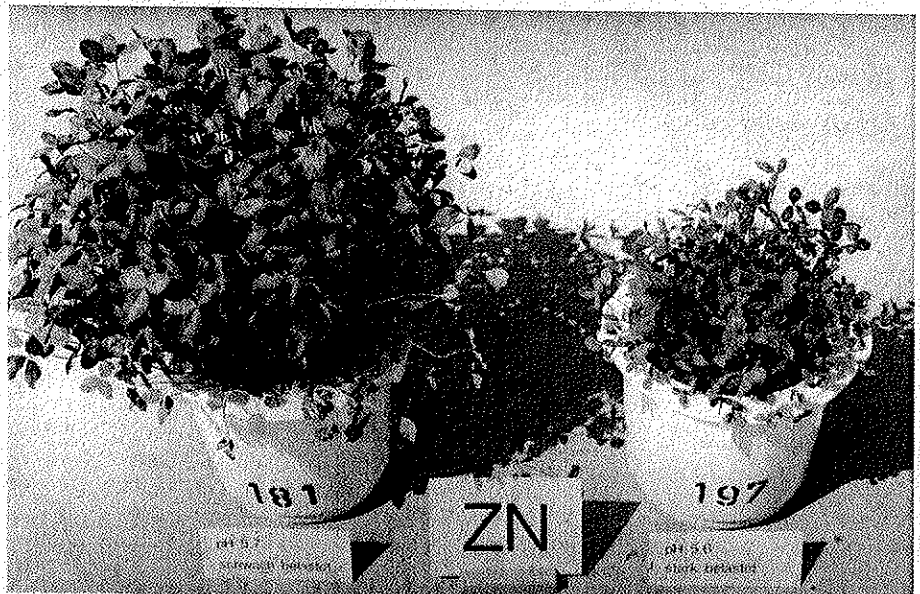


Abb. 1. Zu hohe pflanzenverfügbare Zinkkonzentrationen im Boden wirken auf Pflanzen wachstumshemmend. Rechts vermindertes Rotkleewachstum auf stark mit Zink belastetem Boden, links normales Rotkleewachstum auf schwach belastetem Boden.

Mögliche Sanierungsmassnahmen

Massnahmen zur Behandlung schwermetallbelasteter Böden sollten gewisse Kriterien erfüllen. Im folgenden sind einige, uns wichtig erscheinende Punkte zusammengefasst:

- Das Risiko einer Schadstoffausbreitung muss eingeschränkt werden. Wenn möglich sollten die Schadstoffe sogar aus dem Boden entfernt werden.
- Die Fruchtbarkeit des belasteten Bodens soll wiederhergestellt werden.
- Die Massnahmen sollen umweltverträglich sein und keine schädlichen Nebenwirkungen aufweisen.
- Menschen und Tiere sollen durch Berühren oder Einnahme des belasteten Bodens keinen Schaden erleiden (Kloke 1987).
- Die Massnahmen sollen langfristig wirksam und finanziell tragbar sein.
- Die Massnahmen sollen in einem zeitlich vernünftigen Rahmen durchgeführt werden können. Auf der Suche nach geeigneten Massnahmen sind die Eigenschaften jedes einzelnen Belastungsstandortes genau zu analysieren. Je nach Art und Ausmass der Kontamination und des damit verbundenen Risikos müssen angemessene Massnahmen durchgeführt werden. Gröb können die heute bekannten Massnahmen in zwei Kategorien eingeteilt werden:

Harte Sanierungen

Bei vielen technisch anspruchsvollen Sanierungsmassnahmen kann der Boden nach der Behandlung nicht mehr zur landwirtschaftlichen Nutzung eingesetzt werden.

Die **Deponierung** von schadstoffbelastetem Bodenmaterial ist aufgrund des knappen Deponieraumes und der angestrebten Erhaltung von Ressourcen nur in sehr beschränktem Mass möglich. Andere praktizierte Sanierungsmethoden wie zum Beispiel die **Waschung**, die **Säureextraktion** (Mesch und Ried 1991) oder die **Verbrennung** von belastetem Boden haben eine zumindest weitgehende Zerstörung der Fruchtbarkeit des behandelten Bodens zur Folge. Bei der Waschung zum Beispiel muss der Boden zuerst ausgehoben und anschliessend fragmentiert werden. Die feine, schadstoffreiche Fraktion wird deponiert, während die grobe Fraktion anschliessend durch Waschung mit Wasser behandelt wird (Weber 1990). Dabei gelangen Schwermetalle in die flüssige Phase und können somit vom Boden getrennt werden. Der gereinigte «Boden» kann nicht mehr in der Landwirtschaft eingesetzt werden, sondern wird oft als Baumaterial verwendet.

Harte Sanierungsmassnahmen sind oft kostspielig und eignen sich kaum für die Behandlung von grossflächig kontaminierten Böden. Diese Methoden eignen sich nur in Fällen kleinräumiger Verschmutzung und bei sehr stark kontaminierten Böden.

Sanfte Sanierungen

Mit Sicherungs- und sanften Sanierungsmassnahmen werden die chemischen, biologischen und physikalischen Eigenschaften der Böden weitgehend intakt gelassen. Der Boden kann weiterhin durch die Landwirtschaft genutzt werden. Zu solchen Massnahmen zählen die **Aufkalkung** (Mohr 1980), der **Einsatz von Bindemitteln** (Czupryna *et al.* 1989; Didier *et al.* 1993), **hyperakkumulierende Pflanzen** (Haase 1988) und **Nutzungsänderungen** (Kloke 1987). Die Methoden sind relativ kostengünstig und erlauben es, den beeinträchtigten Boden an Ort und Stelle zu belassen. Bei bestehenden Belastungen wird eine differenzierte Wiederherstellung der Bodenfruchtbarkeit angestrebt. Warum sind bodenerhaltende Massnahmen vorzuziehen? Die vollständige Wiederherstellung der Multifunktionalität der beeinträchtigten Böden ist nur mit dem Ersatz des belasteten Bodenmaterials durch sauberes Bodenmaterial zu erreichen. Dies ist nicht realisierbar, weil nicht genügend unbelastete Kulturerde zur Rekultivierung vorhanden ist. Ausserdem fehlt für den ausgehobenen Abfallboden der erforderliche Deponieraum. Belastete Böden können aber durch die differenzierte Wiederherstellung der Bodenfruchtbarkeit mit Sicherungs- und sanften Sanierungsmassnahmen wieder nutzbar gemacht werden und benötigen somit keinen Deponieraum. Die beeinträchtigten Böden sollten solange wie möglich an Ort und Stelle belassen und weiter genutzt werden, wenn kein akutes Risiko einer Schadstoffausbreitung besteht. Die Möglichkeit einer Wiedernutzbarmachung wird mit dem Einsatz harter Sanierungsmassnahmen vernachlässigt.

Beim Einsatz von Sicherungs- und sanften Sanierungsmassnahmen müssen allerdings allfällige Nebenwirkungen beachtet werden. Im koordinierten Projekt des Schwerpunktprogrammes Umwelt (SPP-U) «Sanfte Sanierungsmethoden für kontaminierte Böden» werden Massnahmen und allfällige Nebenwirkungen von einigen Behandlungsmethoden untersucht. Für schwermetallbelastete Böden wird einerseits die Immobilisierung der Schwermetalle durch Bindemittel und Aufkalkung untersucht, andererseits prüft man die Eliminierung der Schwermetalle aus dem Boden durch hyperakkumulierende Pflanzen (Krebs *et al.* 1994). Um die Wirkungen der eingesetzten Massnahmen zu prüfen, wurde ein schrittweises Vorgehen gewählt. Wir möchten dieses Vorgehen am Beispiel der Immobilisierung der Schwermetalle durch Bindemittel aufzeigen.

denmaterial können leichtmobilisierbare bioverfügbare Schwermetalle fixiert werden (Didier *et al.* 1993; Mench *et al.* 1994). Mit richtig dosierten Zugaben von Bindemitteln sollen die toxisch wirkenden Schwermetallanteile im Boden immobilisiert werden. Liegt eine Kontamination durch Zink oder Kupfer vor, dürfen diese Schwermetalle nicht vollständig immobilisiert werden (Abb. 2). Wie bereits erwähnt (siehe Einleitung), benötigen nämlich Pflanzen Spuren von Kupfer und Zink für ihr Wachstum. Für die Abschätzung der bioverfügbaren Schwermetallkonzentrationen im Boden wurde die NaNO_3 -Extraktion nach VSBö (1986) verwendet. Verschiedene Bindemittel mit hohem Anteil an Tonmineralien wurden zuerst in Laborversuchen getestet. In Batchversuchen mit gelösten Metallsalzen von Kupfer, Zink und Cadmium wurde die pH-abhängige Adsorption der Schwermetalle an die verschiedenen Bindemittel untersucht.

In einem zweiten Schritt wurde in Gefässversuchen kontaminierter Boden mit verschiedenen Dosierungen der Bindemittel vermischt und bepflanzt. Mit Pflanzen- und Bodenanalysen werden allfällige Nebenwirkungen der Bindemittel auf die Bodenstruktur und den Nährstoffhaushalt frühzeitig erkannt. Durch geeignete Bindemittel und angemessene Dosierungen können allfällige Nebenwirkungen in den Feldversuchen vermieden werden. In einer dritten Phase werden die Bindemittel in einem Kleinparzellenfreilandversuch eingesetzt und unter Freilandbedingungen geprüft.

... im Laborversuch

In Versuchen mit einzelnen Metallsalzlösungen von Kupfer, Zink und Cadmium wurde das Adsorptionsvermögen verschiedener Bindemittel im Batchverfahren, das heisst in Gefässen ohne Durchfluss, getestet. Dabei wurde unter anderem Kiesschlamm als Bindemittel eingesetzt. Kiesschlamm ist ein Abfallprodukt der Kiesgewinnung mit Anteilen von Tonmineralien (40 Gew.-%) und organischem Material (8 Gew.-%), welches sich als gutes Bindemittel für Zink erweist (Abb. 3). Analoge Versuche mit Na-Montmorillonit ergaben bei gleichem pH-Wert ein deutlich geringeres Adsorptionsvermögen für Zink als bei Kiesschlamm (Abb. 4). Die Experimente zeigten, dass die Adsorption der Schwermetalle an die

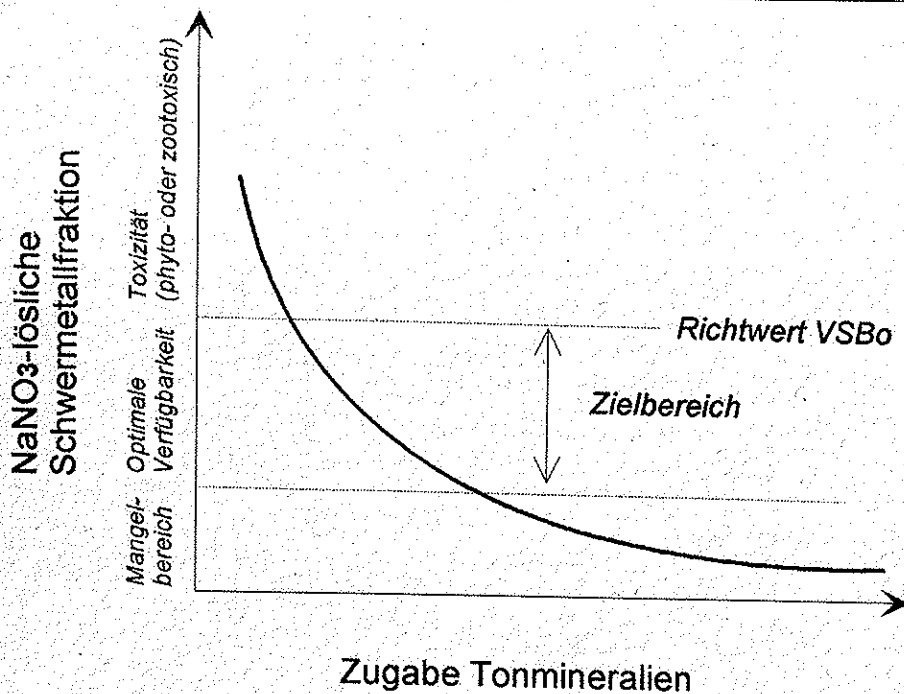


Abb. 2. Schematische Darstellung der Immobilisierung und Pflanzenverfügbarkeit von Kupfer und Zink im Boden in Abhängigkeit der Zugabe von Tonmineralien. (VSBo: Verordnung über Schadstoffe im Boden).

Tonmineralien stark vom pH-Wert der Lösung abhängig ist.

... im Gefässversuch

Nach den Laborversuchen wurden Gefässversuche durchgeführt. Es stellte sich die Frage, ob auch im realen Boden die mobilen Schwermetallkonzentrationen durch Beimischung von Bindemitteln vermindert werden können und ob allfällige Nebenwirkungen auftreten. Ausserdem sollten die Versuche Anhaltspunkte über die benötigte Dosis an Bindemitteln bei gegebener Schwermetallbelastung eines

Bodens geben. Als Bindemittel wurden Kiesschlamm, Natrium-Montmorillonit und Aluminium-Montmorillonit eingesetzt.

Für den Versuch wurde ein durch Klärschlamm stark mit Zink (löslicher Gehalt, extrahiert nach VSBo: 3 ppm Zink) belasteter Landwirtschaftsüberboden (0-20 cm) verwendet. Vor dem Einfüllen in die Töpfe wurden verschiedene Mengen Bindemittel mit dem Boden vermischt. Anschliessend wurde Rotklee gesät und in einem Klimaraum mit künstlicher Belichtung und definierter Temperatur aufgezogen.

Durch die Beimischung von Kiesschlamm und Natrium-Montmorillonit konnte wie erwartet eine starke Reduktion der NaNO_3 -extrahierbaren Zinkfraktion im Boden erreicht werden. Bei Zugabe von Aluminium-Montmorillonit hingegen wurde ein starker Anstieg der NaNO_3 -extrahierbaren Zn-Fraktion festgestellt (Abb. 5). Eine Erklärung dieser Verhalten lässt sich durch die Betrachtung der pH-Werte im Boden in Abhängigkeit der Bindemittelzugaben finden. Währenddem Kiesschlamm und Natrium-Montmorillonit eine pH-Erhöhung im Boden bewirkten, führte die Beimischung von Aluminium-Montmorillonit zu einer pH-Abenkung im Boden (Abb. 6). Sinkende pH-Werte bewirken eine Mobilisierung der Schwermetalle im Boden (König *et al.* 1986).

Der Rotklee-Ertrag konnte nicht in Beziehung zu den löslichen Zinkgehalten im Boden gesetzt werden. Andere Effekte wie Versalzung durch hohe Chlor-Einträge bei Aluminium-Montmorillonit oder Bodenstrukturveränderungen durch hohe Natrium-Montmorillonit-Beimischungen überlagern die wachstumshemmende Wirkung von hohen löslichen Zinkgehalten (siehe Abb. 7).

... im Feldversuch

Im kommenden Jahr sollen Bindemittel zum ersten Mal unter Freilandbedingungen in schwermetallbelasteten Landwirtschaftsböden eingesetzt werden. An drei Standorten in der Schweiz werden je 24 Kleinparzellen mit Bindemitteln behandelt. Als Bepflanzungen wurden Engli-

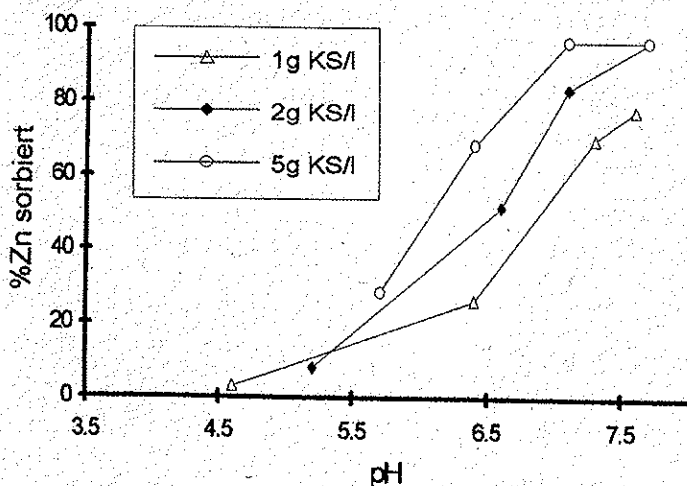


Abb. 3. Batchversuche mit 10^{-4} M ZnCl_2 -Lösungen im Labor: Adsorption von Zink an Kiesschlamm (KS) in Abhängigkeit des pH-Werts.

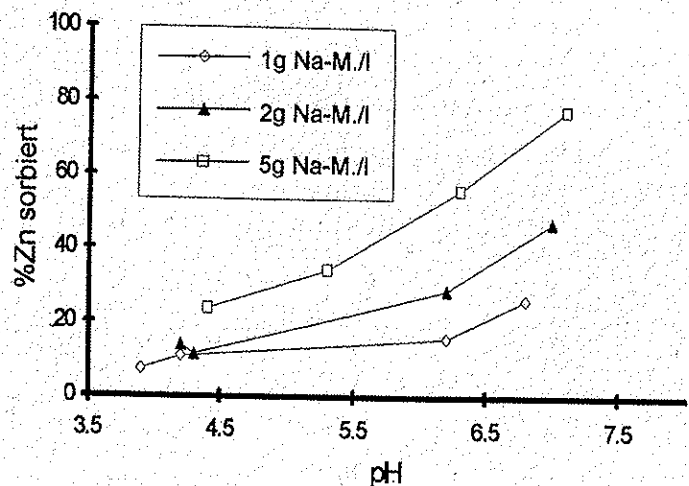


Abb. 4. Batchversuche mit 10^{-4} M ZnCl_2 -Lösungen im Labor: Adsorption von Zink an Natrium-Montmorillonit in (Na-M.) in Abhängigkeit des pH-Werts.

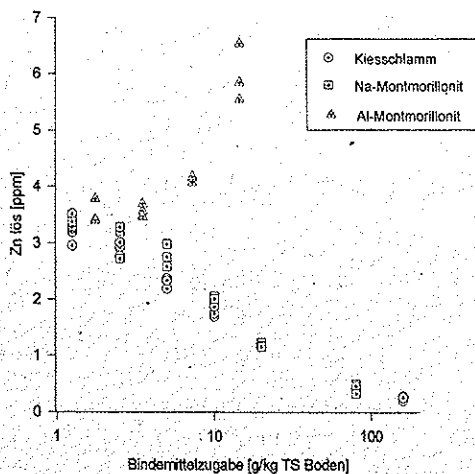


Abb. 5. Gefäßversuch mit Bindemittelzugaben zu zinkbelastetem Boden: Abhängigkeit des NaNO_3 -verfügbaren Zinks im Boden von der beigemischten Bindemittelzugabe.

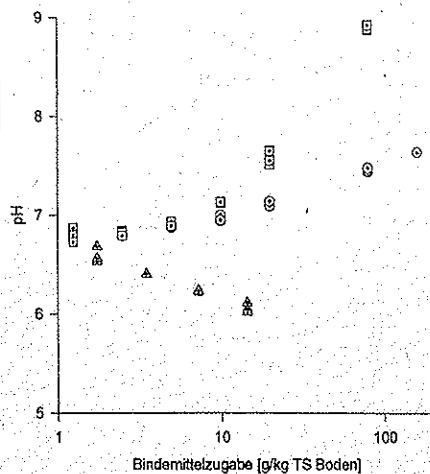


Abb. 6. Gefäßversuch mit Bindemittelzugaben zu zinkbelastetem Boden: Auswirkungen der Bindemittelzugaben auf den pH-Wert (H_2O) des Bodens.

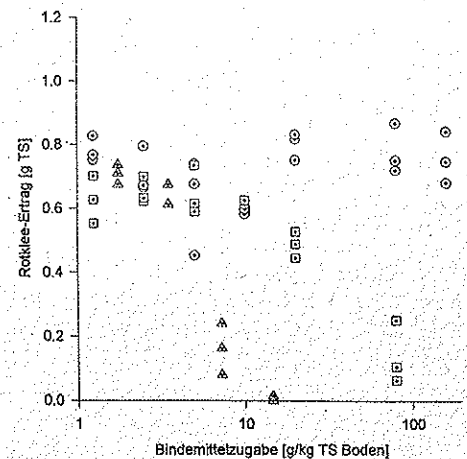


Abb. 7. Gefäßversuch mit Bindemittelzugaben zu zinkbelastetem Boden und anschließender Rotklee-Aussaats. Auswirkungen der Bindemittelzugaben auf den Rotklee-Ertrag nach dem ersten Schnitt.

ches Raygras (*Lolium perenne*) und Lattich (*Lactuca sativa*) gewählt. Diese Pflanzen wurden gewählt, weil Lattich sich durch eine hohe Schwermetallaufnahme und tiefe Empfindlichkeit gegenüber hohen Schwermetallgehalten im Boden auszeichnet und Raigras ein Vertreter der in der Schweiz angebauten Futterpflanzen mit mässiger Schwermetallaufnahme ist. Am Ende des Versuchs werden mit Boden- und Pflanzenanalysen die Effekte der Bindemittelzugaben auf die Mobilität der Schwermetalle und Nährstoffe verifiziert.

Schrittweises Vorgehen wichtig

Durch das schrittweise Vorgehen konnten wichtige Erkenntnisse für die Durchführung der Feldversuche zur Immobilisierung von Schwermetallen gewonnen werden. Laborversuche zeigen das Adsorptionsvermögen von Kiesschlamm und Na-Montmorillonit in Funktion des pH-Werts. Mit den Gefäßversuchen konnte der Einfluss der Bindemittelzugaben auf die löslichen Schwermetallgehalte im Boden gezeigt werden. Wichtige Erkenntnisse zur angemessenen Dosierung der Bindemittel können aus diesem Versuch abgeleitet werden.

Der Einfluss der löslichen Zinkgehalte im Boden auf den Rotklee-Ertrag wurde im Gefäßversuch von Versalzungseffekten und Bodenstrukturveränderungen überlagert. Durch die Wahl der richtigen Bindemittel können Versalzungseffekte und Bodenstrukturveränderungen im Feldversuch verhindert werden.

In Feldversuchen werden die in Labor- und Gefäßversuchen gemachten Erfahrungen unter Freilandbedingungen geprüft.

LITERATUR

Das Literaturverzeichnis ist bei den Autoren erhältlich.

RÉSUMÉ

Technique douce d'assainissement d'un sol contaminé par des métaux lourds

L'immobilisation *in situ* des métaux lourds, par l'adjonction d'agents de liaison constitue une technique douce d'assainissement pour des sols faiblement contaminés par les métaux lourds. En premier lieu, elle ne modifie pas la qualité des sols; autre avantage, elle permet la poursuite de l'exploitation agricole d'un sol contaminé.

Les expériences ont utilisé différents agents de liaison sélectionnés en fonction de leur haute teneur en argile. Des expériences ont été menées au laboratoire pour évaluer la capacité d'adsorption du zinc soluble par les agents de liaison en fonction du pH. Il est apparu que le limon de gravier (produit de déchet de l'exploitation du gravier) et la montmorillonite à sodium sont des agents de liaison caractérisés par une forte capacité d'adsorption. Lors d'expériences faites en vases de végétation sur du trèfle violet (*Trifolium pratense*) des agents de liaison ont été ajoutés aux sols contaminés par le zinc afin d'abaisser la teneur en zinc soluble à un niveau inférieur à la valeur prescrite par l'Ordonnance sur les polluants du sol. Le but étant d'éviter pour les plantes des carences en zinc et autres éléments nutritifs. Afin de vérifier les résultats des expériences faites en laboratoire et en vases de végétation, de nouvelles expériences sont en voie de réalisation sur de petites parcelles aménagées sur le terrain.

SUMMARY

Mild remediation techniques for heavy-metal contaminated soils

In situ immobilization of heavy metals by application of binding agents is suggested as a mild remediation technique to treat contaminated soils posing hazard to the environment. Mild remediation techniques do not significantly affect soil quality and allow further agriculture use of contaminated soils. Different binding agents with high clay contents were chosen for experiments. Gravel sludge, which is a waste product from gravel industry, and Sodium Montmorillonite show high adsorption capacities. With the help of these laboratory experiments, it was possible to estimate necessary doses of binding agents for pot growth experiments with red clover (*Trifolium pratense*). Binding agents mixed with zinc contaminated soil reduced the NaNO_3 -soluble zinc below the guide value given by the Swiss Ordinance Relating To Pollutants In Soil. The purpose of the study is to lower bioavailable zinc in soil and to avoid plant physiological deficiency of either zinc or other essential cations for plant growth. To verify results of laboratory and pot growth experiments, mini-plot field experiments will be conducted this year.

KEY WORDS: remediation, heavy metals, binding agents, clay minerals, adsorption, bioavailability.