Zeitschrift: Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik : VPK = Mensuration, photogrammétrie, génie rural

Herausgeber: Schweizerischer Verein für Vermessung und Kulturtechnik (SVVK) = Société suisse des mensurations et améliorations foncières (SSMAF)

Band: 99 (2001)

Heft: 2

Artikel: Sanierung von mit Zn und Cd verunreinigten Böden unter einer Hochspannungsleitung

Autor: Egli, Markus / Monn, Ervin / Furrer, Gerhard

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-235734

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 15.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Sanierung von mit Zn und Cd verunreinigten Böden unter einer Hochspannungsleitung

M. Egli, E. Monn, G. Furrer

Die 150/220-kV-Leitung zwischen Mettlen (LU) und Gösgen (SO) wurde vollständig abgebrochen. Die Masten dieser Leitung waren feuerverzinkt und der Boden an den Maststandorten mit Zn und Cd stark belastet. Je nach Bodenazidität überschritten die löslichen Zn-Konzentrationen den Sanierungswert massiv. Folgende Bodensanierungstechnologien wurden in Bezug auf die vorliegende Kontamination genauer überprüft: «harte» Sanierung: Aushub und Deponierung sowie Bodenwäsche; «sanfte» Sanierung: Inaktivierung der Schwermetalle durch Immobilisierung sowie Phytoextraktion. Die radikale Massnahme, Aushub und Deponierung, und die sanftere Lösung, Immobilisierung der Schwermetalle durch Kalkung, scheinen zur Sanierung dieser Böden am besten geeignet zu sein. Folgende Empfehlungen wurden formuliert: Bodenaushub und Deponierung bei Standorten mit pH < 5.5, Kalkung der Standorte mit 5.5 < pH < 7, vorläufig keine Massnahmen bei pH > 7. Die Sanierung solcher Kleinststandorte mittels «sanften» Methoden hat in der Schweiz bislang Pioniercharakter. Die geplante Überwachung (Monitoring) für die nächsten zehn Jahre dient zur Überprüfung der Wirksamkeit der eingeleiteten Massnahmen.

La ligne aérienne 150/220-kV entre Mettlen (LU) et Gösgen (SO) a été démontée complètement. Les mats de cette ligne étaient zingués à chaud. Par conséquent le sol était contaminé aux endroits de l'emplacement des mats avec du zinc et du cadmium. Suivant l'acidité du sol, les concentrations de zinc solubles ont massivement dépassé la valeur d'assainissement. En conséquence, les technologies d'assainissement du sol suivantes ont été examinées quant à la contamination existante: (a) assainissement «dur»: excavation et mise en dépôt ainsi que lavage du sol, (b) assainissement «doux»: inactivation des métaux lourds par l'immobilisation ainsi qu'extraction des plantes. La mesure radicale, soit excavation et mise en dépôt, et la solution plus douce, soit immobilisation des métaux lourds par chaulage, semblent être les plus appropriées pour l'assainissement de ces sols. Les recommandations suivantes ont été formulées: excavation du sol et mise en dépôt près des emplacements avec pH inférieur à 5.5, chaulage des emplacements avec pH entre 5.5 et 7, et sursis de mesures lorsque le pH est supérieur à 7. L'assainissement de ces petits sites au moyen de méthodes «douces» relève à ce jour, en Suisse, de caractère de pionnier. La supervision projetée (monitoring) pour les prochains dix ans sert au contrôle de l'efficacité des mesures prises.

La linea da 150/220 kV tra Mettlen (LU) e Gösgen (SO) è stata completamente smantellata. I suoi piloni erano zincati a fuoco e i relativi ancoraggi a terra presentavano un alto tenore di Zn e Cd, al punto che, a dipendenza dell'acidità del terreno, le concentrazioni solubili di Zn superavano di gran lunga i valori limite. In presenza di una tale contaminazione si sono prese in considerazione le seguenti tecniche di risanamento del suolo: (a) risanamento «duro»: scavo e discarica oppure lavaggio del suolo; (b) risanamento «dolce»: inattivazione dei metalli pesanti tramite immobilizzazione oppure fitoestrazione. Per il risanamento di questo suolo specifico sono risultate efficaci la misura più radicale di scavo e discarica e quella più leggera di immobilizzazione dei metalli pesanti tramite apporto di calcio. Di conseguenza, si sono emesse le raccomandazioni seguenti: scavo del suolo e discarica nei punti con un pH minore di 5.5, calcificazione nei punti con un pH tra 5.5 e 7, attualmente nessun provvedimento in presenza di un pH maggiore di 7. Finora in Svizzera, l'applicazione di metodi «dolci» per risanare superfici così contenute rivestiva un carattere pionieristico. Il monitoraggio previsto per i prossimi dieci anni servirà a verificare l'efficacia delle misure applicate.

Die 150/220-kV-Freileitung Mettlen-Gösgen wurde in der Mitte der dreissiger Jahre erstellt. Im Rahmen einer Kapazitätssteigerung der Elektrizitätsübertragung haben sich ATEL (Aare-Tessin AG für Elektrizität), CKW (Centralschweizerische Kraftwerke) und NOK (Nordostschweizerische Kraftwerke) dazu entschlossen, die alte Leitung abzubrechen und durch eine doppelsträngige 400-kV-Leitung zu ersetzen. Von der alten Leitung befanden sich ca. 70 Maststandorte im Kanton Luzern. Aufgrund der Umweltgesetzgebung war für den Abbruch und Neubau dieser Hochspannungsleitung eine Umweltverträglichkeitsprüfung (UVP) notwendig. Das massgebende Verfahren war das Genehmigungsverfahren mit dem Eidgenössischen Starkstrominspektorat als Genehmigungsbehörde. Wie sich im Verlauf der UVP herausstellte, waren die Masten dieser Leitung feuerverzinkt. Eine Belastung des Bodens mit Schwermetallen war somit zu erwarten.

Resultate der Bodenuntersuchungen

An repräsentativen Maststandorten wurden Bodenproben mit unterschiedlicher Entfernung zum Mastzentrum entnommen und die Totalgehalte an Blei, Cadmium und Zink bestimmt. Die Resultate zeigten einerseits an allen Standorten stark erhöhte Konzentrationen an Zink und Cadmium und andererseits, dass Blei kein Problemelement darstellt (Tab. 1). Die Zn-Werte (HNO_3-Auszug) lagen massiv über dem Richtwert und oft in der Nähe des Sanierungswertes gemäss Verordnung über die Belastung des Bodens (VBBo; Schweizerischer Bundesrat, 1998), während Cd häufig den Prüfwert überschritt.

Generell werden zwei Arten von Standorten unterschieden:

- Trägermasten: Bedingt durch die geringe Grundfläche (4x4 m) war der Schwermetallgehalt im Boden des Mastzentrums stark konzentriert.

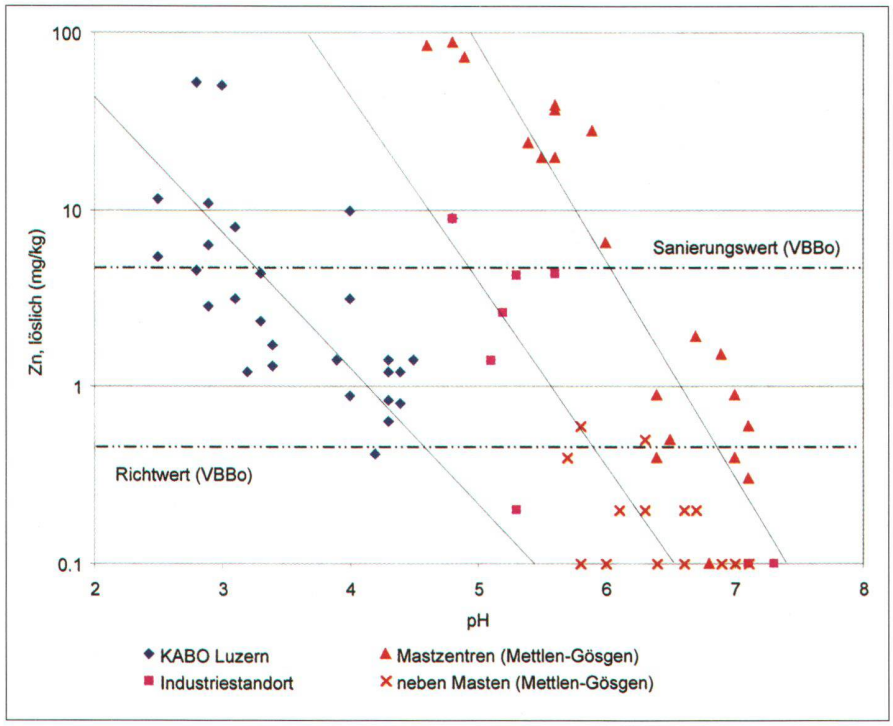

Abb. 1: $NaNO_3$ extrahierbares Zn als Funktion des pH-Wertes ($CaCl_2$) im Boden und in Abhängigkeit der Belastung. KABO = Kantonales Bodenbeobachtungsnetz (kaum belastet), Industriestandort in der Agglomeration Luzern (mittlere Belastung) und Standorte in den Zentren der Masten der Leitung Mettlen-Gösgen mit einer sehr hohen Zn-Belastung sowie der unmittelbare Bereich um diese Maststandorte (mittlere Belastung).

- Abspannmasten: Der Boden an diesen Standorten war wesentlich geringer belastet, bedingt vor allem durch die grössere Grundfläche (8x8 m) und der Möglichkeit einer Bodenbewirtschaftung im Zentrum dieser Masten.

In Zusammenarbeit mit der ETH (Institut für terrestrische Ökologie, ETHZ) wurden in einem nächsten Schritt ergänzende Daten erhoben und vor allem die Frage nach der entsprechenden Sanierung des Materials geklärt. Spezielle Beachtung bei der Auswahl der Standorte galt dem pH-Wert des Bodens. Ein möglichst breites pH-Spektrum (saure bis neutrale Verhältnisse) wurde erfasst, da die Löslichkeit der Schwermetalle Cd und Zn sehr stark von der Bodenazidität abhängt. Die Analysen bestätigten die hohen Totalkonzentrationen im Zentrum von Trägermasten. Sie zeigten auch, dass Zn bereits an schwach sauren Standorten (pH-Wert < 6.5) den Sanierungswert gemäss VBBo für lösliches Zn überschritt (bis zum 90-fachen; vgl. Abb. 1). Sanierungsmassnahmen waren somit unausweichlich. Ein Quervergleich mit Daten aus dem KABO (Kantonales Bodenbeobachtungsnetz) Luzern und einem weiteren mit Zn belasteten Industriestandort zeigte, dass die Zn-Löslichkeit unabhängig der entsprechenden Vorbelastung bei pH-Werten > 7 generell unter dem Richtwert der VBBo zu liegen kommt. Je höher jedoch die Gesamtbelastung des Standorts ist, desto stärker ist der Anstieg des löslichen Zn mit abnehmendem pH-Wert.

Untersuchte Sanierungstechniken

Ziel von Bodensanierungen ist im Allgemeinen die Beseitigung oder zumindest die Begrenzung von gesundheitlichen Gefährdungen. Hierzu sind in den vergangenen Jahren eine Vielzahl von Verfahren entwickelt und zur Anwendung gebracht worden. Die meisten dieser Verfahren haben aber den Nachteil, dass der Boden selbst in seiner ökologischen Qualität stark beeinträchtigt oder sogar ganz zerstört wird (Schulin, 1996). «Harte» Sanierungsverfahren wie z.B. die Bodenwäsche oder die Deponierung von verunreinigtem Material, haben ihre Berechtigung dort, wo gemessen an der Reduktion der Risiken, die Auswirkungen auf die Bodenqualität in Kauf genommen werden können (Schulin, 1996). Nebst eigentlichen Altlasten gibt es eine grosse Menge kleinerer und grösserer Bodenbelastungsflächen, die einerseits so stark mit Schadstoffen belastet sind, dass die Bodenfruchtbarkeit gefährdet ist, bei denen jedoch andererseits die akuten ökotoxi-

Beprobungsort	Abstand zum Mast	pH ($CaCl_2$)	Totalgehalt nach VBBo [mg / kg] Blei	Cadmium	Zink
Mastzentrum		6.2	33	3.9	1817
Richtung Süd-Ost	1 m	6.8	25	1.5	663
	5 m	6.0	24	0.7	185
	10 m	5.7	25	0.6	105
Richtung Süd-West	1 m	6.1	23	1.1	464
	5 m	5.5	25	0.5	85
	10 m	5.4	25	0.4	62
Richtwerte (mg/kg):		Pb =50, Cd = 0.8, Zn = 150			
Prüfwerte (mg/kg):		Pb = 200, Cd = 2, Zn = -			
Sanierungswerte (mg/kg):		Pb = 2000, Cd = 30, Zn = 2000			

Tab. 1: Typische Schwermetallgehalte im Zentrum eines Trägermasten und in dessen Umgebung.

Abb. 2: Abbruch eines Trägermastens: Separierung Ober- und Unterboden, Abbruch des Betonsockels.

kologischen Gefahren nicht so hoch sind, dass eine harte Sanierung unbedingt gerechtfertigt ist. Folgende Verfahren wurden im Rahmen einer Machbarkeitsstudie näher untersucht:

1. «Harte» Sanierung:
   - Bodenwäsche
   - Aushub und Deponierung
2. «Sanfte» Sanierung:
   - Phytoextraktion
   - Immobilisierung

Harte Sanierung

Die klassische Bodensanierung sieht vor, dass kontaminiertes Erdreich je nach Stärke der Verunreinigung entweder ausgehoben und gewaschen oder deponiert wird. Bei einer Bodenwaschung muss damit gerechnet werden, dass ein beachtlicher Teil des ursprünglichen Materials nachträglich noch deponiert werden muss. Das als klassisch zu bezeichnende Reinigungssystem der Marktführerin der Bodenwäsche in der Schweiz erbringt eine gute Reinigungsleistung bei Böden mit einem Ton- und Schluffanteil bis ca. 40%. Die zu sanierenden Böden wiesen mit einem Anteil von rund 70% Ton und Schluff ein für diese Sanierungstechnik zu hohen Wert aus (Tab. 2). Das Verfahren ist eher auf die Reinigung von Aushub von industriellen Produktionsstandorten ausgelegt (Kiese, Sande). Bei höherem Humus-, Ton- und Schluffanteil ist es weder besonders ökonomisch noch konkurrenzfähig. Deshalb war diese Technik für diesen Fall nicht geeignet.

Verfahren wie bspw. die Extraktion von Schwermetallen mit organischen Säuren oder spezielle Flotationsverfahren, beide in Deutschland vorhanden, könnten in Zukunft für ähnliche Problemfälle sicherlich interessant sein. Doch bei diesen Verfahren müsste nebst den zusätzlichen Transportkosten auch mit einem beachtlichen Restanteil gerechnet werden, der deponiert werden muss (30–50%). Aushub und Deponierung des belasteten Bodenmaterials in einer Inertstoff- (Abspannmasten) bzw. in einer Reststoffdeponie (Trägermasten) wäre hingegen ohne Probleme in der Schweiz durchführbar. Kostenmässig ist die Deponierung die günstigste Variante. Ein Export nach Deutschland kombiniert mit einer entsprechenden Aufbereitung verursacht ca. 50–100% Mehrkosten (IUTO, 1999).

Sanfte Sanierung

Phytoextraktion

Mit Phytoextraktion ist die Entfernung von Schwermetallen aus dem Boden mit Hilfe von Pflanzen gemeint. Dabei werden Pflanzen verwendet, die besonders hohe Metallmengen in ihre oberirdischen Pflanzenteile aufnehmen können, die bei der Ernte dem System entzogen werden. Die wesentlichsten Faktoren für die Leistung der Phytoextraktion sind:

- Tiefe der eigentlichen Belastung: die Schwermetalle müssen sich in der durchwurzelten Bodenschicht befinden
- die Schwermetalle müssen in leicht löslicher, pflanzenverfügbarer Form vorliegen
- die Transferfaktoren (Schwermetallkonzentration in den Pflanzen dividiert durch Schwermetallgehalt im Boden) müssen möglichst gross sein
- möglichst grosse Biomasseproduktion.

Die Auswahl der schwermetall-akkumulierenden Pflanzen erfolgte nach folgenden Kriterien: hohe Schwermetallgehalte in der Pflanze, hohe Biomassenproduktion, kleines Ernteintervall. Ausgewählt wurden folgende vier Pflanzenarten: Brassica juncea, Thlaspi caerulescens, Zea mays und Nicotiana tabacum. Um die Bodengehalte wieder in die Nähe des Richtwertes zu bringen würden unter der Voraussetzung optimaler Bedingungen, einer maximalen Aufnahmefähigkeit und einer unbegrenzten Bioverfügbarkeit für die Sanierung folgende Zeiträume bean-

Position	Sand %	Schluff %	Ton %
Zentrum	24.3 – 39.8	35.6 – 42.1	24.6 – 34.1
5 m Entfernung	26.7 – 45.5	32.4 – 42.2	22.1 – 34.0

Tab. 2: Korngrössenverteilung der Bodenproben im Nahbereich der Hochspannungsmasten.

sprucht: 180 bis 310 Jahre mit Brassica juncea, 400 bis 680 Jahre mit Thlaspi caerulescens, 90 bis 150 Jahre mit Zea mays bzw. 90 bis 320 Jahre mit Nicotiana tabacum.
Die Sanierung der Maststandorte mittels Phytoextraktion würde somit je nach Zinkgehalt im Boden und verwendeter Pflanzenart zwischen rund 100 und 700 Jahren dauern und fiel somit aufgrund der extrem langen Dauer ausser Betracht.

Immobilisierung

Ziel einer Immobilisierung von Schwermetallen im Boden ist es, deren Pflanzenverfügbarkeit zu senken und das Auswaschrisiko in Grundwasser und Oberflächengewässer zu minimieren. Für die phytotoxische Wirkung von Schwermetallen sind die gelösten und leicht mobilen Anteile im Boden entscheidend. Durch die Zugabe von Bindemitteln in den Boden kann die Löslichkeit von Schwermetallen verändert werden. Diese Bindemittel müssen folgende Anforderungen erfüllen: Entfernung der gelösten toxischen Schwermetalle aus der Bodenlösung, hohe Wirksamkeit, keine Beeinträchtigung der Nährstoffversorgung der Pflanzen, keine Beeinträchtigung der Bodenstruktur, hohe Kosteneffizienz und Dauerhaftigkeit (Furrer et al., 1996). Verschiedene Techniken können dabei unterschieden werden:

1. Immobilisierung der Schwermetalle durch Zugabe von Kalk: Eine Erhöhung des pH-Wertes führt zu einer starken Abnahme der löslichen Schwermetallfraktion (Krebs, 1996). Diese Methodik eignet sich gut für saure Böden. Damit aber der gewünschte pH-Wert über mehrere Jahre stabil bleibt, ist unter Umständen eine Nachkalkung erforderlich.
2. Erhöhung der Kationenaustauschkapazität durch Zugabe von Bindemitteln: Als Bindemittel eignen sich Tonmineralien aufgrund ihrer grossen spezifischen Oberfläche. Die Bindung von Cd und Zn beispielsweise an Montmorillonit (Lothenbach et al., 1998) erfolgt vorwiegend über elektrostatische Kräfte.
3. Spezifische Adsorption mittels modifizierten Mineralien: Durch die Beschichtung von Tonmineralien mit Aluminium kann die Adsorptionsfähigkeit verbessert werden. Labor- und Topfexperimente (Lothenbach et al., 1998) zeigten, dass Al-Montmorillonit Zn-Kationen chemisch spezifisch und somit stärker binden kann als unbehandelter Montmorillonit.

Diese drei verschiedenen Prinzipien können auch kombiniert werden: z.B. Kiesschlamm (Abfallprodukt bei der Kiesgewinnung) enthält häufig Kalk und grössere Mengen an Tonmineralien. Die Kosten für eine Kalkung oder für eine Zugabe an Tonmineralien sind sehr niedrig. Da diese Methoden jedoch nicht ohne entsprechende Überwachung (Monitoring über ca. zehn Jahre) angewendet werden dürfen, sind periodische Nachmessungen der pflanzenverfügbaren Schadstoffgehalte im Boden notwendig. Die daraus resultierenden Kosten sind jedoch immer noch wesentlich niedriger als bei einer konventionellen Methode. Da die Böden in unserem Fall einen bereits sehr hohen Tongehalt aufweisen, drängt sich eine Zugabe von Tonmineralien nicht auf. Vernünftiger erscheint eher eine reine Aufkalkung der Böden.

Masten	vorher pH	nachher pH	vorher Zn(lösl) [mg/kg]	nachher Zn(lösl) [mg/kg]	vorher Zn(tot) [mg/kg]	nachher Zn(tot) [mg/kg]	vorher Cd(tot) [mg/kg]	nachher Cd(tot) [mg/kg]	nachher Cd(lösl)* [mg/kg]
1	6.2	6.9		0.31	1817	739	3.9	1.7	0.003
2	5.7	6.9	32.7	0.09	1815	692	3.8	1.5	0.001
3	6.7	6.7		0.30	1440	601	2.7	1.3	0.002
4	4.8	6.6	82.3	0.37	1145	376	3.1	1.0	0.002

*Cd(lösl) wurde vor Mastabbruch nicht gemessen

Tab. 3: Zn- und Cd-Konzentrationen sowie pH-Werte im Boden (Zentrum von Trägermasten) vor und unmittelbar nach dem Mastabbruch (Kalkung der Standorte noch nicht erfolgt). Zn (tot) = totale (HNO_3-extrahierbare) Zn-Fraktion, Zn (lösl.) = lösliche ($NaNO_3$-extrahierbare) Zn-Fraktion.

Getroffene Entscheidungen

Prinzipiell eignen sich die konventionelle Methode (Aushub und Deponierung) sowie die Immobilisierung der Schwermetalle durch Kalkung zur Sanierung der Böden im Bereich der Mastzentren. Da es sich bei allen Standorten um Kleinstflächen handelt und ein genereller Bodenaushub (mit Deponierung) sowie eine entsprechende Zufuhr für den Ersatz des Bodenmaterials wenig sinnvoll erscheint, wurde die sanfte Methode (Immobilisierung von Schwermetallen) bevorzugt, die konventionelle Methode jedoch nicht gänzlich fallen gelassen. Folgende Empfehlungen wurden formuliert: Bodenaushub und Deponierung bei Standorten mit pH < 5.5, Kalkung der Standorte mit 5.5 < pH < 7, keine Massnahmen bei pH > 7. Verknüpft mit diesen Massnahmen wurde für einige Standorte über die nächsten zehn Jahre eine Überwachung der pH-Werte und pflanzenverfügbaren Zn-Konzentrationen angeordnet.

Monitoring

Im Anschluss an die Bauarbeiten wurden im Frühjahr 2000 die ersten Proben im Rahmen des Monitoringprogramms entnommen. In dieses Programm wurde auch ein Standort mit einem ursprünglich sehr tiefen pH-Wert aufgenommen um insbesondere hier die Entwicklung der löslichen Zn-Konzentrationen zu verfolgen. Die entsprechenden Resultate lassen sich aus der Tabelle 3 entnehmen. Der Boden war unmittelbar nach Abbruch der Masten noch nicht gekalkt. Als Vergleichswerte dienen die in der VBBo festgeleg-

	Zink [mg/kg]		Cadmium [mg/kg]	
	total	löslich	total	löslich
Richtwert	150	0.5	0.8	0.02
Prüfwert	–	–	2[1)]	0.02
			10[2)]	–
Sanierungswert	2000	5.0	30[3)]	0.1
			20[4)]	0.1

[1)] Nahrungs- und Futterpflanzenanbau
[2)] Nutzungen mit möglicher direkter Bodenaufnahme (z.B. Kinderspielplätze)
[3)] Landwirtschaft und Gartenbau
[4)] Haus- und Familiengärten

Tab. 4: Richt-, Prüf- und Sanierungswerte (Anhang 1 VBBo).

ten Richt-, Prüf- und Sanierungswerte (Tab. 4). Auch bei noch so sorgfältiger Bauweise lässt sich auf Kleinstflächen eine Vermischung von kontaminiertem mit nicht kontaminiertem Material nicht gänzlich vermeiden. Durch das Ausbaggern und Wiedereinfüllen des Bodenmaterials wurde zum Teil Material aus dem Oberboden mit darunter- und anliegendem, karbonathaltigem Boden vermischt (vgl. Abb. 2). Diese Vermischung erklärt, weshalb der pH-Wert ohne Kalken bereits stark angestiegen ist und die Totalkonzentrationen (Cd und Zn) und im speziellen die löslichen Konzentrationen von Zn erniedrigt wurden (Tab. 3). Bereits geringe Mengen an zusätzlichem Kalk, welche durch die Vermischung in den Boden gelangten, liessen den pH-Wert ansteigen (vgl. insbesondere Masten 4, Tab. 3). Ein solches System ist nicht zwangsläufig stabil und kann nach Zehr des Karbonats schnell wieder tiefe pH-Werte erreichen. Unabhängig dieser bereits positiven Resultate werden die Standorte gemäss getroffener Entscheidung gekalkt und die Standorte nach einem, fünf und zehn Jahren wiederbeprobt.

Literatur:

IUTO (Institut für Umwelttechnik und Ökologie), 1999. Bodensanierung bei zinkbelasteten Maststandorten einer Hochspannungsleitung. Bericht zhd. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft BUWAL, Luzern.

Krebs, R. 1996. In situ immobilization of heavy metals in polluted agricultural soil – an approach to gentle soil remediation. Diss. ETH No. 11838, Eidgenössisch Technische Hochschule Zürich.

Lothenbach, B., Krebs, R., Furrer, G., Gupta, S.K. & Schulin, R., 1998. Immobilization of cadmium and zinc in soil by Al-montmorillonite and gravel sludge. European Journal of Soil Science, 49, 141–148.

Schulin, R. 1996. Sanfte Bodensanierung: Chance oder Utopie? In: Abschlusstagung zum koordinierten SPPU-Projekt «Problemsubstanzen im Boden und sanfte Bodensanierung» (Institut für Terrestrische Ökologie der ETHZ und Fachverein Arbeit und Umwelt Bern), pp. 3–4, Zürich.

Schweizerischer Bundesrat, 1998. VBBo (Verordnung vom 1. Juli 1998 über die Belastung des Bodens). Eidgenössische Drucksachen- und Materialzentrale, Bern.

Dr. Markus Egli
Kantonales Amt für Umweltschutz
Bodenschutzfachstelle
Postfach
CH-6002 Luzern
markus.egli@lu.ch

Ervin Monn
Dipl. Natw. ETH
Umweltberatung Monn
Via dalla Staziun 24
CH-7187 Camischolas
ervin.monn@smile.ch

Dr. Gerhard Furrer
Institut für Terrestrische Ökologie
Grabenstrasse 3
CH-8952 Schlieren
furrer@ito.umnw.ethz.ch

ABONNEMENTSBESTELLUNGEN
unter folgender Adresse

Jahresabonnement 1 Jahr:
Inland sFr. 96.–, Ausland sFr. 120.–

SIGWERB AG
Dorfmattenstrasse 26
CH-5612 Villmergen
Telefon 056/619 52 52
Telefax 056/619 52 50