

## Originalarbeiten

## Bewertung der potenziellen Grundwasserbelastung von deponierten Hochofengasschlämmen

## Vergleich der chemischen Zusammensetzung von Porenwässern und DIN 38414-Eluaten

Thilo Rennert und Tim Mansfeldt\*

Arbeitsgruppe Bodenkunde und Bodenökologie, Fakultät für Geowissenschaften, Ruhr-Universität Bochum, D-44780 Bochum

\* Korrespondenzautor (Tim.Mansfeldt@rub.de)

DOI: <http://dx.doi.org/10.1065/uwsf2004.02.075>**Zusammenfassung**

**Ziel und Hintergrund.** Hochofengasschlamm ist ein Abfallprodukt der Roheisenerzeugung, das Schadstoffe wie Blei, Zink, Fluorid und Cyanid enthält und über Auswaschung das Grundwasser belasten kann.

**Methoden.** Wir untersuchten die chemische Zusammensetzung von 27 Proben deponierter Hochofengasschlämme in Porenwässern, die durch Zentrifugieren feldfrischen Materials gewonnen wurden, und in Eluaten nach DIN 38414 Teil 4 (S 4).

**Ergebnisse.** Sowohl die Porenwässer als auch die Eluate waren neutral bis alkalisch (pH 7,3 bis 10,7) und wurden von Alkali- und Erdalkalimetallen sowie Sulfat und Nitrat dominiert. Die Konzentrationen sämtlicher untersuchten Elemente und Verbindungen waren in den Porenwässern meist deutlich höher als in den Eluaten. Die durchschnittlichen Konzentrationen in den Porenwässern der umweltrelevanten Bestandteile Blei (0,18 mg l<sup>-1</sup>), Zink (1,5 mg l<sup>-1</sup>), Fluorid (10,6 mg l<sup>-1</sup>) und Gesamtcyanid (1,8 mg l<sup>-1</sup>) lagen deutlich über den Prüfwerten der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung für den Wirkungspfad Boden-Grundwasser. Blei-, Zink- und Gesamtcyanidkonzentrationen in den Porenwässern wurden in Eluaten sehr stark unterschätzt, da diese Konzentrationen in den Eluaten um 70 bis 90% geringer als in den Porenwässern waren.

**Schlussfolgerung.** Im Fall deponierter Hochofengasschlämme liefern Eluate nach DIN 38414 Teil 4 (S 4) unrealistisch geringe Stoffkonzentrationen zur Sickerwasserprognose.

**Schlagwörter:** Blei; Cyanide; Eluate (S 4); Fluorid; Hochofengasschlamm; Porenwasser; Sickerwasserprognose; Zink

**Abstract****Evaluation of potential groundwater contamination of landfilled blast-furnace sludge: Comparison of the chemical composition of pore waters and DIN 38414-eluates**

**Goal and Scope.** Blast-furnace sludge is a waste originating from pig-iron production and contains contaminants such as lead, zinc, fluoride and cyanide assumably contaminating the groundwater by leaching.

**Methods.** We investigated the chemical composition of 27 samples of landfilled blast-furnace sludge in pore waters which were obtained by the centrifugation of fresh material and elution with water according to DIN 38414 part 4 (S 4).

**Results.** The pore waters as well as the eluates were neutral to alkaline (pH 7.3 to 10.7) and were dominated by alkali and alkaline-earth metals as well as sulphate and nitrate. The concentrations of all elements and compounds investigated were mostly clearly larger in the pore waters than in the eluates. The average concentrations of environmentally relevant constituents such as lead (0.18 mg l<sup>-1</sup>), zinc (1.5 mg l<sup>-1</sup>), fluoride (10.6 mg l<sup>-1</sup>), and total cyanide (1.8 mg l<sup>-1</sup>) in the pore waters were distinctly larger than the inspection value of the German Federal Soil Protection Ordinance for the pathway soil-groundwater. Lead, zinc, and total cyanide concentrations in the pore waters were largely underestimated by the eluates, as these concentrations were 70 to 90% lower in the eluates compared to the pore waters.

**Conclusion.** In the case of landfilled blast-furnace sludge, eluates according to DIN 38414 part 4 (S 4) provide low concentrations which are unrealistic to forecast concentrations in the seepage water.

**Keywords:** Blast-furnace sludge; cyanide; eluates; fluoride; lead; pore water; zinc

**1 Ziel und Hintergrund**

Hochofengasschlämme sind ein Abfallprodukt der Roheisenerzeugung. Das im Hochofen entstehende Gas wird nass gereinigt, wodurch Staubpartikel entfernt werden. Der dabei entstandene Hochofengasschlamm wird in Absetzbecken verpumpt, wo er entwässert. Da es keine wirtschaftliche Verwertungsmöglichkeit für Hochofengasschlamm gab und gibt, wird er deponiert: Früher oft in unsicheren Deponien, heute in ordnungsgemäß betriebenen.

Die Hauptbestandteile von Hochofengasschlämmen sind Eisenoxide wie Hämatit, Wüstit und Magnetit (bis zu 50%) und

koksartige Kohlenstoffverbindungen (Lopez-Delgado et al. 1998, Mansfeldt 2003). Je nach Beschickung des Hochofens enthalten Hochofengasschlämme silikatische Bestandteile wie Quarz und karbonatische Bestandteile wie Calcit und Dolomit. Deponierte Hochofengasschlämme enthalten jedoch auch Schwermetalle wie Blei mit Gesamtgehalten von bis zu 19,5 g kg<sup>-1</sup> und Zink mit Gesamtgehalten von bis zu 86,4 g kg<sup>-1</sup> (Mansfeldt 2003). Ein weiteres Gefährdungspotential sind Gesamtcyanidgehalte von bis zu 5,5 g kg<sup>-1</sup> (Mansfeldt und Dohrmann 2001). Deponierte Hochofengasschlämme sind also hoch belastete Substrate, deren Potenzial zur Grundwassergefährdung bislang jedoch noch nicht untersucht wurde.

Zur Abschätzung der Schadstoffkonzentration im Sickerwasser und damit zu möglichem Austrag in das Grundwasser ist in der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV 1999) die Elution mit Wasser vorgeschrieben, wenn keine Möglichkeit zur Beprobung des tatsächlichen Sickerwassers gegeben ist. Eluate sind als Bodensättigungsextrakt oder nach DIN 38414 Teil 4 (S 4), d.h. durch Ausschütteln der Proben mit Wasser für 24 Stunden, anzufertigen, bzw. können als Ammoniumnitratextrakt mit 1 M  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  (DIN 19730) erfolgen.

Unterschiedliche Methoden zur Gewinnung von Eluaten führen jedoch zur unterschiedlichen Stoffkonzentrationen in der Lösungsphase und damit zu abweichenden Sickerwasserprognosen. So zeigten Utermann et al. (1998) in Bodensättigungsextrakten von 63 Bodenproben unterschiedlicher Nutzungen und Gesamtgehalte deutlich höhere mittlere Gehalte an Pb, Cd, Cr, Co, Cu, Ni und Zn als in S 4-Eluaten der entsprechenden Proben. Die Autoren verdeutlichen weiterhin, dass die Schwermetallkonzentrationen in den Ammoniumnitratextrakten denen der Bodensättigungsextrakte ähnlicher waren als die der S 4-Eluate. Analog gilt für die Extraktion von Cyaniden aus 23 Bodenproben ehemaliger Kokerei- und Gaswerkstandorte, dass die Konzentrationen in Bodensättigungsextrakten höher waren als in Ammoniumnitratextrakten und diese wiederum höhere Konzentrationen als S 4-Eluate aufwiesen (Rennert und Mansfeldt 2004).

Das Ziel dieser Arbeit war es, die chemische Zusammensetzung von Eluaten nach DIN 38414 Teil 4 (S 4) von 27 Proben deponierter Hochofengasschlämme mit der von Porenwässern, die durch Zentrifugieren feldfrischen Materials gewonnen wurden, zu vergleichen und damit die Aussagefähigkeit dieser Eluate bezüglich einer Sickerwasserprognose zu überprüfen. Mit den Porenwässern wurde die Lösung gewonnen, die im abgelagerten Schlamm vorhanden ist und seit längerer Zeit mit der Festphase in Kontakt steht. Daher ist davon auszugehen, dass diese Porenwässer eher die tatsächliche Lösung repräsentieren als Eluate, die durch Suspendieren eines Substrats in Wasser oder einer wässrigen Lösung gewonnen werden.

## 2 Material und Methoden

### 2.1 Herkunft und Entnahme der Proben

Die untersuchten Proben entstammten einer Hochofengasschlammdeponie im Ruhrgebiet. Sie war von 1930 bis 1982 in Betrieb, die heutige Vegetation wird von Birken dominiert. Es wurden 10 Schürftgruben mit Tiefen von 110 bis 150 cm angelegt. Insgesamt wurden insgesamt 27 feldfrische Proben entnommen, in Polyethylenbeuteln verpackt und unmittelbar danach zur Analyse ins Labor transportiert.

### 2.2 Gewinnung und Analyse von Porenwässern und Eluaten

Sämtliche Proben wurden feldfrisch gesiebt (4 mm), und nur der Feinboden wurde für die weitere Schritte benutzt. Zur Gewinnung des Porenwassers wurden insgesamt ca. 2 kg jeder Probe 30 min lang bei 15300 g zentrifugiert. Die überstehenden Lösungen wurden dekantiert und membranfiltriert

(0,45  $\mu\text{m}$ -Cellulose-Nitrat-Filter). Anschließend erfolgte die Bestimmung der Elemente Na und K durch Atomemissionsspektrometrie und die der Elemente Ca, Fe, Mg, Pb und Zn durch Atomabsorptionsspektrometrie (AAS 3100, Perkin Elmer, Überlingen). Je nach Konzentration wurde die Flammen- oder Graphitrohrtechnik eingesetzt. Die Anionen  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{F}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$  und  $\text{SO}_4^{2-}$  wurden per Ionenchromatographie mit Leitfähigkeitsdetektion (DX 500, Dionex, Idstein), Gesamtcyanid nach Mansfeldt und Biernath (2001) bestimmt. Die Messung des pH-Werts erfolgte potentiometrisch (pH 90, WTW, Weilheim), die der elektrischen Leitfähigkeit konduktometrisch (LF 521, WTW). Die Alkalinität wurde durch Titration mit 0,1 M HCl bestimmt.

Die Eluate wurden nach DIN 38414 (S 4) hergestellt, indem je nach aktuellem Wassergehalt 72 bis 173 g feldfrische Probe (50 g Trockensubstanz entsprechend) in dreifacher Wiederholung mit 500 ml Reinstwasser in 1000 ml-Polyethylenflaschen in einem Überkopfschüttler 24 Stunden lang geschüttelt wurden. Filtration und Analytik erfolgten wie oben für die Porenwässer beschrieben.

### 2.3 Chemische und mineralogische Zusammensetzung der deponierten Hochofengasschlämme

Die Hauptelemente der untersuchten Hochofengasschlämme sind C (19%), Fe (15,8%), Ca (8,3%) und Si (7,7%, jeweils durchschnittliche Angaben). Die Gehalte von Pb und Zn betragen 1% und 3,3%. Die Hochofengasschlämme sind größtenteils röntgenamorph (durchschnittlich 59%), allerdings lassen sich mittels Röntgenfluoreszenzspektroskopie Calcit, Quarz, Kaolinit und Hämatit neben weiteren Mineralen nachweisen (Mansfeldt 2003).

## 3 Ergebnisse und Diskussion

Die untersuchten Porenwässer wiesen neutrale bis alkalische pH-Werte auf und zeigten die Freisetzung von Alkali- und Erdalkalimetallen in teilweise sehr hohen Konzentrationen, z.B.  $663 \text{ mg Ca}^{2+} \text{ l}^{-1}$  (Tabelle 1).

Sulfat ist das dominierende Anion in den Porenwässern, gefolgt von Nitrat und Fluorid. Ein Vergleich der Maximal- und Minimalkonzentrationen zeigt für z.B. Calcium und Sulfat sehr hohe Schwankungen zwischen den Proben auf. Die Schwermetallkonzentrationen sind im Vergleich zu denen der Alkali- und Erdalkalimetalle sehr gering (durchschnittlich  $0,18 \text{ mg Pb l}^{-1}$  und  $1,45 \text{ mg Zn l}^{-1}$ ), was in der geringen Löslichkeit der Oxide und Hydroxide begründet ist, in denen Blei und Zink in Hochofengasschlämmen vermutlich vorliegen (van Herck et al. 2000, Mansfeldt 2003). Die Freisetzung von Zink aus Hochofengasschlämmen nimmt mit sinkendem pH-Wert stark zu, wie Mansfeldt (2003) mit  $\text{pH}_{\text{stat}}$ -Versuchen zeigte, so dass eine Bodenversauerung auf diesem Standort mit erhöhter Schwermetallmobilität einher gehen würde. Das gleiche gilt für die Freisetzung von Blei (eigene unveröffentlichte Daten). In Böden nimmt die Bleiverfügbarkeit erst bei pH-Werten  $< 4,5$  und die Zinkverfügbarkeit bei pH-Werten  $< 5$  zu (Scheffer und Schachtschabel 2002). Derartige pH-Werte wurden in den Porenwässern nicht gefunden, dennoch überstiegen trotz der neutralen bis alkali-

**Tabelle 1:** Chemische Zusammensetzung von Porenwässern und Eluaten nach DIN 38414 Teil 4 (S 4) deponierter Hochfengasschlämme (n = 27). Mit Ausnahme der Alkalinität (in mmol H<sup>+</sup> l<sup>-1</sup>) sind alle Konzentrationsangaben in mg l<sup>-1</sup>, die Einheit der elektrischen Leitfähigkeit (ELF) ist µS cm<sup>-1</sup>

Chem. Zusammensetzung	PW <sup>a</sup>				S 4-El. <sup>b</sup>				% Abw. <sup>c</sup>
	MW <sup>d</sup>	s <sup>e</sup>	Max.	Min.	MW	s	Max.	Min.	
pH	8,3	0,9	10,6	7,3	8,5	0,9	10,7	7,7	
ELF	1223	871	4010	480	516	291	1657	34	-57,8
Alkal.	3,21	1,97	8,38	0,64	2,83	0,85	4,48	0,79	-11,8
CN <sub>ges</sub>	1,8	2,9	12,25	0,02	0,51	0,79	3,37	0,01	-71,7
F <sup>-</sup>	10,6	6,3	24,1	2,6	9,8	5,9	27,8	3,4	-7,5
Cl <sup>-</sup>	7,9	3,6	16,7	2,6	1,5	0,6	3,2	0,7	-81,0
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	37,9	57,5	192,8	0,4	2,1	3,3	13,3	0,1	-94,6
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	391	565	2340	24,5	96,6	139	659	7,4	-75,3
Na <sup>+</sup>	20,1	14,5	59,0	5,6	4,7	3,3	16,3	0,8	-76,6
K <sup>+</sup>	95,2	90,5	327	0,8	33,3	25,7	115	2,7	-65,0
Ca <sup>2+</sup>	170	160	663	20,0	55,8	48,7	275	6,2	-67,2
Mg <sup>2+</sup>	48,0	56,7	244	0,7	13,3	10,7	37,7	0,1	-72,3
Fe	0,7	0,8	2,9	0,05	0,4	0,3	1,6	0,14	-42,9
Pb	0,18	0,1	0,5	0,1	0,016	0,015	0,051	0,001	-91,1
Zn	1,45	2,8	10,8	0,05	0,16	0,19	0,6	0,01	-89,0

<sup>a</sup> Porenwässer, <sup>b</sup> Eluate nach DIN 38414 Teil 4 (S 4), <sup>c</sup> prozentuale Abweichung der Konzentrationen der Eluate nach DIN 38414 Teil 4 (S 4) von den Konzentrationen der Porenwässer, <sup>d</sup> Mittelwert, <sup>e</sup> Standardabweichung, <sup>f</sup> Alkalinität

schen pH-Werte die durchschnittlichen Blei- und Zinkkonzentrationen die Prüfwerte (Pb 25, Zn 500 µg l<sup>-1</sup>) für den Wirkungspfad Boden-Grundwasser der BBodSchV mit 180 und 1,450 µg l<sup>-1</sup> deutlich. Die Diskrepanz zwischen tatsächlichen Konzentrationen und dem Prüfwert (750 µg l<sup>-1</sup>) war im Fall des Fluorids mit 10,4 mg l<sup>-1</sup> noch gravierender. Ähnliches gilt für das Gesamtcyanid, dessen durchschnittliche Konzentration von 1,8 mg l<sup>-1</sup> den Prüfwert von 50 µg l<sup>-1</sup> weit überschreitet. Die Schwankungsbreite der Konzentrationen war auch hier bei einem Maximum von 12,25 mg l<sup>-1</sup> sehr groß. Es handelt sich hierbei allerdings um gering toxische Eisencyanokomplexe, die von Hochfengasschlämmen selbst in hohem Maß adsorbiert werden können (Rennert und Mansfeldt 2002).

Die S 4-Eluate zeigten dieselben Tendenzen wie die Porenwässer, z.B. bezüglich der pH-Werte oder der Hauptkationen und -anionen. Die Differenz der Maximal- und Minimalkonzentrationen zwischen den Proben war im Vergleich zu den Porenwässern weniger groß. Die in den Eluaten gemessenen Stoffkonzentrationen waren in jedem Fall geringer als in den Porenwässern. Dies galt in besonderem Maße für die Schwermetalle Blei und Zink, deren Konzentration in den Eluaten um ca. 90% von der in den Porenwässern abwich. Diese sehr starke Abweichung ist wahrscheinlich eine Folge der langsamen Auflösung von Schwermetalloxiden und -hydroxiden in diesem pH-Milieu, die in den Porenwässern näher am Gleichgewicht ist als in den Eluaten, die durch nur 24-stündiges Schütteln gewonnen wurden. Auch die Gesamtcyanidkonzentrationen wurden stark unterschätzt. Allein im Falle des Fluorids gab es nur geringe Unterschiede bei den Konzentrationen in Porenwässern und Eluaten. Dies kann dadurch erklärt werden, dass die Fluoridkonzentrationen von der Auflösung des Minerals Fluorit, CaF<sub>2</sub>, gesteuert wer-

den, und sich die Auflösungsreaktion im Gleichgewicht befindet (Mansfeldt 2003). Fluorit wurde im Hochofenprozess als Zuschlagsstoff verwendet, Auflösung und Fällung sind also die dominierenden Prozesse in deponierten Hochfengasschlämmen bezüglich dieses Minerals.

Die Abweichungen der Konzentrationen in den Porenwässern und den wässrigen Eluaten schwanken zwischen den untersuchten Verbindungen und Elementen sehr stark (7,5% bis 91,1%), was in ihren unterschiedlichen Bindungsformen und -stärken begründet ist. Daher gibt es keine allgemeine Abweichung zwischen S 4-Eluaten und Porenwässern, die für alle Elemente und Verbindungen gelten könnte.

Die Konzentrationen in den Porenwässern und Eluaten korrelierten teilweise stark miteinander (Tabelle 2).

Allerdings ist für die Beurteilung eines Vergleichs nicht der Korrelationskoeffizient entscheidend, sondern die Steigung der Regressionsgeraden. Wenn zwei Methoden gleichwertig sind, ist die Steigung 1. Die Steigung der Regressionsgeraden der Fluoridkonzentrationen ist 1 am nächsten, was durch die Gleichgewichtsauflösung des Minerals Fluorit (s.o.) be-

**Tabelle 2:** Regressionsgleichungen für Konzentrationen umweltrelevanter Stoffe in Porenwässern und Eluaten nach DIN 38414 Teil 4 (S 4) deponierter Hochfengasschlämme (n = 27)

Stoff	Regressionsgleichung <sup>a</sup>	r <sup>2</sup> <sup>b</sup>
Blei	$C_{S4} = -0,002 + 0,128C_{PW}$	0,49
Zink	$C_{S4} = 0,057 + 0,064C_{PW}$	0,62
Fluorid	$C_{S4} = 1,366 + 0,848C_{PW}$	0,71
Gesamtcyanid	$C_{S4} = 0,073 + 0,249C_{PW}$	0,83

<sup>a</sup> C<sub>S4</sub>: Stoffkonzentration im Eluat nach DIN 38414 Teil 4 (S 4); C<sub>PW</sub>: Stoffkonzentration im Porenwasser; <sup>b</sup> Korrelationskoeffizient r

gründet sein sollte. Die geringen Steigungen für die anderen umweltrelevanten Stoffe zeigen, dass die naturnahen Konzentrationen in den Porenwässern von den Konzentrationen in den Eluaten systematisch unterschritten werden.

#### 4 Schlussfolgerungen

Die Prüfwerte für den Wirkungspfad Boden-Grundwasser für die in der BBodSchV genannten Schadstoffe Blei, Zink, Fluorid und Gesamtcyanid wurden in den untersuchten Porenwässern deponierter Hochofengasschlämme teilweise deutlich überschritten. Daher ist mit einer Verlagerung und einem Austrag ins Grundwasser zu rechnen. Der Austrag sollte allerdings wegen der langsamen Sickerwasserbewegung, die sich aus den sehr hohen Porenvolumina der Hochofengasschlämme (durchschnittlich  $0,82 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ) ergibt, ebenfalls langsam und gering sein (Rennert und Mansfeldt 2002). In den Eluaten wurde mit Ausnahme des Fluorids im Vergleich zu den Porenwässern nur ein geringer Anteil der genannten Stoffe gefunden. Unter der Annahme, dass die Porenwässer eher die tatsächliche Zusammensetzung der Lösung abgelagerter Hochofengasschlämme repräsentieren, schätzen die S 4-Eluate das Gefährdungspotenzial deponierter Hochofengasschlämme nicht richtig ein.

#### 5 Empfehlung und Ausblick

Aus oben genannten Gründen sollten im Fall der hier untersuchten deponierten Hochofengasschlämme Analysen von Eluaten nach DIN 38414 Teil 4 (S 4) nicht zur Sickerwasserprognose verwendet werden. Ob dies auch für deponierte Hochofengasschlämme anderer Standorte und Zusammensetzung sowie deponierte Abfälle weiterer industrieller Prozesse gilt, bleibt ungeklärt, so dass zusätzlicher Forschungsbedarf besteht.

**Danksagung.** Wir danken Karin Greef, Kai F. Gockel, Willi Gosda, Heidi Kerkhoff und Gerlind Wilde, Ruhr-Universität Bochum, für die Durchführung der Analysen.

#### Cyanide in Böden und Altlasten

Seit einigen Jahren werden von PD Dr. Tim Mansfeldt, Arbeitsgruppe Bodenkunde und Bodenökologie der Ruhr-Universität Bochum, umweltrelevante Forschungen zu Cyaniden in Böden und Altlasten durchgeführt. Nachdem zunächst das Ausmaß dieser Umweltproblematik untersucht wurde, standen Fragen zur Extraktion, Analytik und Identifikation von cyanidhaltigen Festphasen im Vordergrund (siehe z.B. UWSF – Z. Umweltchem. Ökotox. 12, 2000; 13, 2001; 14, 2002). Es folgten Arbeiten zum Sorptions- und Transportverhalten von Eisencyanokomplexen an Eisenoxiden sowie auch an Böden. Gegenwärtige Arbeiten beschäftigen sich mit der Löslichkeit von Eisencyanokomplexen unter variierenden Redoxbedingungen in Böden und dem Verhalten dieser Komplexe gegenüber redoxaktiven natürlichen Festphasen wie Manganoxiden und organischen Substanzen. Ein Publikationsverzeichnis zum Themenkomplex der Cyanide ist unter <http://homepage.ruhr-uni-bochum.de/Tim.Mansfeldt/> zu finden.

#### Literatur

- BBodSchV (1999): Verordnung zu Durchführung des Bundes-Bodenschutzgesetzes (Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung BBodSchV) vom 16.7.1999, BGBl., I, 1554–1582
- DIN 19730 (1997): Bodenbeschaffenheit – Extraktion von Spurenelementen mit Ammoniumnitratlösung, VCH, Weinheim
- DIN 38414 (1984): DEV Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlämmenterung, Schlamm und Sedimente (Gruppe S). Bestimmung der Eluierbarkeit mit Wasser (S 4). Teil 14, VCH, Weinheim
- Lopez-Delgado A, Perez C, Lopez FA (1998): Sorption of heavy metals on blast furnace sludge. *Water Res* 32, 989–996
- Mansfeldt T (2003): Mobilität und Mobilisierbarkeit von eisenkomplexierten Cyaniden – Untersuchungen in Kokereiböden und Gichtgasschlämmen. Materialien zur Altlastensanierung und zum Bodenschutz 16. Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen, Essen. <<http://www.lua.nrw.de>>
- Mansfeldt T, Biernath H (2001): Method comparison for the determination of total cyanide in deposited blast furnace sludge. *Anal Chim Acta* 435, 377–384
- Mansfeldt T, Dohrmann R (2001): Identification of a crystalline cyanide-containing compound in blast furnace sludge deposits. *J Environ Qual* 30, 1927–1932
- Rennert T, Mansfeldt T (2002): Sorption and desorption of iron-cyanide complexes in deposited blast furnace sludge. *Water Res* 36, 4877–4883
- Rennert T, Mansfeldt T (2004): Cyanide extraction from contaminated soil: A method comparison. *Europ J Mineral Process Environ Protection*, im Druck
- Scheffer F, Schachtschabel P (2002): Lehrbuch der Bodenkunde. 15. Auflage, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg
- Utermann J, Gäbler H-E, Hindel R, Kues J, Mederer J, Pluquet E (1998): Schwermetallgehalte im Bodenwasser – ein Vergleich von drei Extraktionsverfahren. *Z Angew Geol* 44, 204–209
- van Herck P, Vandecasteele C, Swennen R, Mortier R (2000): Zinc and lead removal from blast furnace sludge with a hydrometallurgical process. *Environ Sci Technol* 34, 3802–3808

Eingegangen: 06. Oktober 2003

Akzeptiert: 06. Februar 2004

OnlineFirst: 09. Februar 2004

