

Austrag von Schwermetallen aus deponierten Abfällen: Vergleich der Konzentrationen in Lysimeter-Ausläufen mit Prognosen aus verschiedenen Labor- Extraktionsverfahren

R. BODE und K.-W. BECKER

Problemstellung

Die Bodenschutzverordnung der Bundesrepublik Deutschland (BBodSchV) gibt für Austräge von Schadstoffen aus Ablagerungen von Boden- und bodenähnlichen Materialien Prüfwerte für Schadstoffe im Sickerwasser vor, die nicht überschritten werden dürfen. Die BBodSchV nennt mehrere, z.T. vorläufige Methoden, deren Übernahme in die Praxis nicht frei von Kritik ist und die einer Eichung mit realen Sickerwasserwerten bedürfen.

In einer Lysimeteranlage wurden aus 10 Abfallmaterialien Sickerwasser gewonnen und auf ihre Schadstoffkonzentrationen untersucht. Die Materialien wurden nach ihrer mengenmäßigen Bedeutung und ihrer typischen Zusammensetzung ausgewählt. Bau und Betrieb der Lysimeter wurden bestmöglich den Bedingungen eines Deponiebetriebs angepasst.

Material und Methoden

Die Lysimeteranlage

110 cm lange PVC-Rohre mit 20 cm Durchmesser wurden zur Vermeidung von Kontaminationen innen mit einem PE-Endlosschlauch ausgekleidet. Über eine Schicht von 25 cm Quarzsand wurden jeweils 50 cm Prüfmaterial gefüllt. Den oberen Abschluss bildete eine 30 cm mächtige Schicht aus Material natürlicher Oberböden: Ackerböden mit schwach saurer und mit neutraler Reaktion (pH 5,5 bzw. 7) sowie ein Waldboden mit organischer Auflage und saurer Reaktion (pH 4). Die Lysimeter wurden in je dreifacher Wiederholung oberflächengleich mit der Umgebung im Freiland in den Boden eingebaut und blie-

ben unbewachsen. Das Sickerwasser wurde gesammelt und im Verlauf von 2 Jahren 10 mal beprobt.

Eingesetzte Materialien

Bankettschälgut (BSG 1; BSG 2) wird regelmäßig am Straßenrand abgeschält und besteht aus verlorenem Transportgut, an Reifen anhaftendem Material, Streugut, Materialabrieb des fließenden Verkehrs etc.. Potentielle Schadstoffe entstammen z.B. dem Transportgut, Autoabgasen oder zinkhaltiger Lösung von Leitplanken. Die Belastung des Materials ist stark von der Nutzung der zugehörigen Straßen abhängig. Kreuzungs- und Abfahrtsbereiche sind beispielsweise wegen des erhöhten Brems- und Reifenabriebs stärker belastet. Es wurde Schälgut von einer Landstraße und von einer mit Leitplanken versehenen Autobahn beprobt.

Kehrgut (Kehrg) stammt aus der regelmäßigen Reinigung von Straßen, Gehwegen und Rinnsteinen der Stadt Göttingen. Es enthält neben Reifenabrieb und Schmutzabfall von Fahrzeugen auch Laub, Nadeln, Blüten, Zweige, Hundekot, Papiertaschentücher usw. Es wurde eine Mischung aus mehreren Fegezonen verwendet, Grobmaterial wurde aussortiert.

Pochsand (Pochs) ist Abfall der historischen Erzaufbereitung und wurde auf Halden in der Nähe der Verhüttungsplätze abgelagert. Er enthält noch die verschiedensten Metalle. Hier wurde Sand-Grusmaterial aus dem Zink- und dem Bleibergbau des Harzes verwendet.

Auelehm (Auel): Die Flüsse aus Gebieten mit früherer Bergbautätigkeit führen durch Lösungs- oder Partikelfracht erhebliche Mengen an Schwermetallen, die

bei Hochwasser im Auenbereich abgelagert werden. Es wurde belastetes Bodenmaterial aus dem Auebereich der Innerste eingebaut, wie es bei Baumaßnahmen häufig anfällt.

Gießereirestsand (GRS) entstammt den Eisengießereien. Das flüssige Metall wird in Formen aus Sand gegossen, die mit Bentonit verfestigt sind. Der Ton wird dabei "totgebrannt" und verliert seine Bindefähigkeit, beim Ausleeren der Formen entsteht ein rieselfähiges Sandgemisch.

Bleihüttengranulat (BHG) fällt bei der Bleiherstellung an. Die reduzierte Schlacke mit einem niedrigen Bleigehalt wird zur weiteren Verwendung granuliert.

Bauschutt (RM BS); Müllverbrennungsschlacke (HMVA) und PAK-belasteter Sandboden (RM Bo) wurden von der Bundesanstalt für Materialforschung in Berlin aufbereitet und bereitgestellt. Sie wurden von allen Teilnehmern am Verbundprojekt verwendet und dienen dem Vergleich der Ergebnisse aus den verschiedensten Versuchsansätzen.

Als Blindvariante diente gewaschener Quarzsand (Quarzs).

Materialcharakterisierung der Feststoffe

Es wurden die Korngrößenzusammensetzung, die C- und N-Gehalte sowie die Metallgehalte mittels Röntgenfluoreszenzanalyse und ICP-OES und -MS im Vollaufschluss bestimmt.

Quellstärke

Folgende Extraktionsverfahren wurden angewendet: Königswasser (DIN 38414-7, S7), Wasserextrakt (DIN 38414-4, S4), Ammoniumnitrateextrakt (DIN 19730), Bodensättigungsextrakt (DIN V 19730)

Autoren: R. BODE und Dr. Klaus-Wenzel BECKER, Universität Göttingen, Institut für Bodenwissenschaften, Von Sieboldstraße 4, D-37075 GÖTTINGEN

Anhang A.2). Das S4-Verfahren erfolgte zusätzlich mit einem Fest-Flüssig-Verhältnis von 1:2. Die Lösungen wurden auf 0,45 µm filtriert und jeweils mit ICP-OES und -MS auf Spurenstoffe, die Sickerwässer der Lysimeter zusätzlich auf Sulfat, Chlorid, DOC sowie die gängigen Makroelemente untersucht.

Ergebnisse

Extraktions-Verfahren nach DIN

Nachfolgend werden die Ergebnisse der Elutionsverfahren vorgestellt. Bezug wird dabei auf Untersuchungen an Böden (BIELERT, 1999) und auf die Prüfwerte der BBodSchV genommen (s. *Tabelle 1*).

Eluierbarkeit mit Wasser (DIN 38414-4, S4)

Die untersuchten Bankettschälsgüter zeigen im S4-Eluat teilweise erhöhte Werte. Die Eluatwerte der Autobahnherkunft überschreiten mit 64 bzw. 950 µg/l die Prüfwerte für Kupfer und Zink. Gegenüber natürlichen Böden sind auch Cadmium und Blei erhöht, bleiben nur knapp unter dem Prüfwert. Im Bauschutt ist Chrom erhöht, aber lediglich Nickel kommt an den Prüfwert von 50 µg/l heran. Bei der Müllverbrennungsasche überschreiten Kupfer (134 µg/l), Molybdän (53 µg/l) sowie Antimon (16 µg/l) die Prüfwerte, Chrom ist ebenfalls erhöht. Beim Kehrgut überschreitet Antimon den Prüfwert. Auelehm, Gießereirestsand und Referenzmaterial Boden bleiben ohne Prüfwertüberschreitungen. Beim Pochsand und auch beim Bleihüttengranulat ist Blei mit 93 bzw. 204 µg/l ein Problemelement. Bleihüttengranulat zeigt zudem Prüfwertüberschreitungen bei Arsen (47 µg/l) und Antimon (144 µg/l).

Ammoniumnitratextrakt (DIN 19730)

Der Ammoniumnitratextrakt liefert für die Prüfmaterialien im Vergleich mit natürlichen Böden erhöhte Spurenstoffkonzentrationen und zwar häufiger, als bei den wässrigen Auszügen (S4). Bankettschälgut weist erhöhte Kupfergehalte auf, bei der Autobahnherkunft kommen noch Chrom und Zink hinzu. Bei Bauschutt sind Chrom, Kupfer, Zink, sowie Molybdän erhöht. Besonders hohe Wer-

te bringt die Müllverbrennungsasche, bei der zusätzlich noch Arsen, Cadmium und Antimon stark auffällig sind. Kupfer (104 mg/l) färbte das Eluat blau. Kehrgut bringt hohe Eluatgehalte für Kupfer, Molybdän und Zink. Kupfer ist auch beim Referenzmaterial Boden und beim Pochsand erhöht, der zusätzlich knapp 2 mg/l Blei im Eluat enthält. Das Bleihüttengranulat bringt mit 93 mg/l noch höhere Bleiwerte, weiter sind Arsen, Cadmium, Kupfer, Molybdän, Nickel, Antimon, Zink und andere Elemente erhöht.

Bodensättigungsextrakt (DIN V 19735)

Die Bodensättigungsextrakte liefern vergleichbar hohe Spurenelementgehalte mit häufigen Überschreitungen der Prüfwerte der BBodSchV. Die Bankettschälsgüter bereiten Probleme bei Chrom, Kupfer, Nickel, Blei, Antimon und Zink. Kupfer und Nickel liegen deutlich über dem Prüfwert, bei der Autobahnherkunft zusätzlich auch Cadmium und besonders Zink (9,4 mg/l). Der Bauschutt bringt erhöhte Konzentrationen bei Cadmium, Chrom, Molybdän und Kupfer. Stärker belastet ist der Extrakt der Müllverbrennungsasche. Neben Kupfer (2,2 mg/l) und Molybdän (1 mg/l) überschreiten auch Arsen, Cadmium, Chrom, Blei und Antimon die Prüfwerte. Beim Kehrgut ist Kupfer mit 1 mg/l Problemelement. Ferner liegen Molybdän, Nickel, Antimon und Zink über den Prüfwerten. Unproblematisch sind das Referenzmaterial Boden und auch der Gießereirestsand. Vergleichsweise geringe Probleme zeigt der Auelehm, der nur bei Kupfer und Blei den Prüfwert überschreitet. Blei ist Problemelement beim Pochsand und beim Bleihüttengranulat. Die Konzentrationen liegen mit 3,1 bzw. 17 mg/l weit über dem Prüfwert. Beim Pochsand sind Cadmium, Chrom, Nickel und Antimon mit Prüfwertüberschreitungen zu nennen. Bei Bleihüttengranulat kommen noch Arsen, Kupfer und Zink mit hohen Werten hinzu.

Königswasser (DIN 38414-7)

Mit Königswasser wurden unterschiedliche Anteile der Gesamtgehalte (Vollaufschluss) in Lösung gebracht. Hohe Ausbeuten mit durchschnittlich über 90% wurden bei Kupfer, Magnesi-

um und Zink erzielt. Geringe Ausbeuten (z.T. deutlich < 50%) brachten Aluminium, Cadmium, Chrom, Antimon, Strontium, Kalium, Natrium, Titan und Zirkon. Die Ausbeuten variieren selbst bei Materialien mit vergleichsweise homogener mineralogischer Zusammensetzung erheblich. Die Ergebnisse weichen damit von denen HORNBURGs (2002) ab. Diese Schwankung der Ergebnisse kann nur durch die inhomogene Zusammensetzung des Materials (Gesamtgehalte wie Bindungsformen) erklärt werden.

Vergleich DIN-Verfahren untereinander

Ein Vergleich der Verfahren DIN 38414-4, DIN 19730 und DIN V 19735 ergibt ein diffuses Bild. Der Extrakt mit Wasser liefert geringe, mit Ammoniumnitrat deutlich höhere Eluatkonzentrationen. Das Ausmaß ist von Element zu Element und von Material zu Material stark unterschiedlich. Im Durchschnitt liegen z.B. die Werte für Kupfer um den Faktor 223, für Cadmium um 123 höher. Teilweise werden die Durchschnittswerte allerdings durch Extremwerte bei einzelnen Materialien geprägt. Im Ammoniumnitratextrakt der Müllverbrennungsasche liegt Kupfer um den Faktor 775, (Kehrgut 435, Bankettschälgut der Autobahn 4,1) über dem Wert des wässrigen Extraktes. Der Ammoniumnitratextrakt reagiert auf die einzelnen Materialien unterschiedlich. Bei Hausmüllverbrennungsasche und beim Bleihüttengranulat werden die Konzentrationen des wässrigen Auszugs oftmals um mehr als das 100-fache, bei den Bankettschälgütern selten um mehr als das 10fache überschritten.

Der Bodensättigungsextrakt ergibt höhere Konzentrationen als der wässrige Auszug. Insgesamt sind die Überschreitungen bei einer geringeren Schwankungsbreite nicht ganz so hoch wie beim Ammoniumnitratextrakt. Auch ist die Abhängigkeit der Werte von einzelnen Materialien geringer. Durchschnittlich liegen die Konzentrationen etwas unter denen des Ammoniumnitratextraktes. Aber das Bild ist uneinheitlich: Einige Elemente, etwa Cadmium, zeigen fast durchweg niedrigere Konzentrationen, Chrom hingegen meist höhere Werte als im Ammoniumnitratextrakt.

Tabelle 1: Elementgehalte im S4-Extrakt (Fest-/Flüssig-Verhältnis 1:10) und Prüfwerte (µg/l) und relativ dazu die Gehalte in den übrigen Eluaten

Material / DIN-Verf.		Element										
		As	Cd	Co	Cr	Cu	Mo	Ni	Pb	Sb	Sn	Zn
Prüfwert in µg/l		10	5	50	50	50	50	50	25	10	40	500
BSG 1	S4 1:10 (µg/l)	2,8	0,77	10	9,6	17	13	11	20	3,4	1,2	110
	S4 1:2 / S4 1:10	2,0	0,48	1,5	1,2	7,8	1,5	4,0	0,4	2,1	0,5	1,5
	ANE / S4 1:10	1,5	4,8	1,8	3,1	13	1,7	2,9	0,9	1,4	<2,8	2,6
	BSE / S4 1:10	2,0	4,2	4,2	5,8	36	3,8	17	1,5	3,7	3,4	7,6
BSG 2	S4 1:10 (µg/l)	1,9	0,93	5,2	6,2	64	10	10	17	2,8	<1,2	950
	S4 1:2 / S4 1:10	1,9	2,0	1,7	1,1	4,4	1,5	2,0	1,5	4,3	<>1,3	3,1
	ANE / S4 1:10	5,8	16	3,5	10	4,1	1,6	1,1	2,9	2,8	<>7,8	7,1
	BSE / S4 1:10	2,2	11	4,3	3,8	12	3,2	5,1	4,6	5,7	<>4,6	9,9
RM BS	S4 1:10 (µg/l)	0,52	0,66	7,0	36	6,2	20	48	1,7	0,10	<0,90	<10
	S4 1:2 / S4 1:10	<1,2	<0,30	0,4	2,6	9,4	2,0	0,52	1,7	<1,0	<>3,3	>2,0
	ANE / S4 1:10	18	26	1,6	4,6	222	2,5	1,3	4,3	55	<>12	>62
	BSE / S4 1:10	6,2	9,0	6,0	8,6	52	6,5	0,49	9,6	14	<>10	>1,8
HMVA	S4 1:10 (µg/l)	0,64	0,67	1,2	15	134	53	7,9	2,8	16	0,71	<10
	S4 1:2 / S4 1:10	0,67	<0,15	<0,29	1,1	3,3	3,2	<0,19	1,3	2,0	<2,1	>2,0
	ANE / S4 1:10	433	485	<58	3,9	775	3,6	18	<36	9,4	<423	>3600
	BSE / S4 1:10	22	18	6,8	21	16	19	6,19	44	1,7	22	>28
Kehrg.	S4 1:10 (µg/l)	1,9	0,58	4,0	5,3	1,8	42	13	1,2	12	0,84	<10
	S4 1:2 / S4 1:10	2,4	0,53	2,1	0,9	189	2,3	4,1	0,5	4,8	<1,8	>21
	ANE / S4 1:10	4,7	5,5	6,0	2,5	435	1,2	2,5	8,3	2,8	<6,4	>38
	BSE / S4 1:10	3,4	5,4	4,7	4,5	556	2,84	11	15	3,5	<3,3	>51
RM Bo	S4 1:10 (µg/l)	0,65	0,17	0,33	1,3	3,3	1,5	1,9	0,82	0,31	<0,30	<10
	S4 1:2 / S4 1:10	0,18	<0,24	<0,42	<0,77	1,7	6,2	<0,30	<0,24	2,9	<>2,0	>1,0
	ANE / S4 1:10	1,5	6,5	24	2,9	100	10	23	2,4	3,0	<>4,0	>24
	BSE / S4 1:10	1,5	2,5	13	11	7,7	32	14	6,5	4,2	>2,2	>3,7
Pochs.	S4 1:10 (µg/l)	0,26	0,55	0,81	1,1	<1,0	0,29	4,7	93	0,95	<0,60	<10
	S4 1:2 / S4 1:10	<4,6	0,36	<0,17	<0,91	<>2,0	24	0,74	1,1	3,3	<>1,0	>1,0
	ANE / S4 1:10	23	27	17	<16	>284	48	7	21	4,8	<>18	>10
	BSE / S4 1:10	23	19	22	160	<>58	85	18	34	20	<>29	>6,5
Auel.	S4 1:10 (µg/l)	2,3	0,68	1,1	1,0	21	18	4,4	1,7	3,0	<0,30	<10
	S4 1:2 / S4 1:10	1,0	0,91	0,5	<1,0	1,7	1,4	0,3	0,76	3,1	<>2,0	>1,0
	ANE / S4 1:10	2,1	25	7,4	<4	11	1,3	5,0	5,9	2,2	<>8,0	>6,0
	BSE / S4 1:10	0,83	2,9	4,0	15	6,8	2,0	3,9	16	2,1	<>1,6	>2,9
GRS	S4 1:10 (µg/l)	0,41	0,16	0,20	0,60	0,40	5,7	0,41	0,75	0,87	<0,30	<10
	S4 1:2 / S4 1:10	<0,29	<0,25	1,2	<1,7	<5,0	2,6	<1,5	0,63	3,6	<>2,0	>1,0
	ANE / S4 1:10	1,3	8,8	12	<3,3	230	5,1	34	2,1	1,0	<>4,0	>3,0
	BSE / S4 1:10	7,3	3,1	22	18	23	7,5	12	1,9	6,5	<>1,8	>0,48
BHG	S4 1:10 (µg/l)	47	0,71	<0,28	<2,0	2,2	3,4	<1,2	204	144	<1,2	<10
	S4 1:2 / S4 1:10	3,5	<0,28	<>1,3	<>2,5	1,5	4,4	<>2,5	1,0	4,2	<>2,5	>1
	ANE / S4 1:10	16	737	>35	<>500	318	216	>228	459	2,0	<>500	>750
	BSE / S4 1:10	2,4	65	>103	>407	36	6,9	>119	84	5,4	<>84	>154
Quarzs.	S4 1:10 (µg/l)	0,23	0,14	0,18	0,50	<1,0	0,22	0,41	1,7	0,17	<0,30	<10
	S4 1:2 / S4 1:10	<0,52	<0,29	<0,78	<2,0	>2	<0,36	<1,5	0,82	0,29	<>2,0	>3
	ANE / S4 1:10	2,9	7,9	10	3,0	>124	10	17	76	2,7	<>3,0	>88
	BSE / S4 1:10	1,4	2,9	11	11	>3,1	3,0	9,6	4,3	10	<>1,7	>25
Alle	Durchschnitt (unsichere Werte (<, >) wurden nicht berücksichtigt)											
	S4 1:2 / S4 1:10	1,6	0,9	1,2	1,4	27,4	4,9	1,9	1,0	3,0		
	ANE / S4 1:10	46,3	122,7	9,3	4,3	234,3	27,4	11,1	58,4	7,9		
	BSE / S4 1:10	6,6	12,9	9,8	25,8	82,9	15,6	9,8	20,1	7,0		
Ergebniss des jeweiligen Verfahrens unter der Bestimmungsgrenze, deshalb Faktor kleiner												
Ergebniss des S4-Verfahrens unter der Bestimmungsgrenze, deshalb Faktor größer												
Ergebniss beider Verfahrens unter der Bestimmungsgrenze, deshalb Faktor größer oder kleiner												

Je nach Material bzw. Element prognostizieren die einzelnen Verfahren unterschiedliche Eluatkonzentrationen. Der Extrakt mit Wasser liefert meist die geringsten, Ammoniumnitrat und der Bodensättigungsextrakt fast durchgängig höhere Werte.

Vergleich DIN-Verfahren mit dem Lysimeter-Sickerwasser

Tabelle 1 zeigt den Vergleich der Schadstoffgehalte in den Eluaten der DIN-Verfahren mit denen im Sickerwasser der Lysimeter. Da die Abdeckmaterialien keinen signifikanten Einfluss auf die Zusammensetzung des Sickerwassers hatten, werden hier die Werte aller 9 Lysimeter eines Abfallmaterials gemittelt. Um Einflüsse der anfänglichen Gleichgewichtseinstellung auszuschließen, werden nur Ergebnisse der letzten drei Beprobungstermine berücksichtigt.

Beim S4-Extrakt lassen sich element- und materialbedingte Unterschiede feststellen. Zinn und Zink z.B. werden unter-, Blei deutlich überschätzt. Im Bezug auf die Materialien lässt sich beim Bauschutt eine fast durchgängige Unterschätzung der hohen Sickerwasserkonzentrationen feststellen.

Bei den anderen Verfahren kommt es nur in Einzelfällen zu einer Unterschätzung der Sickerwasserwerte. Der Ammoniumnitratextrakt liefert teilweise sehr hohe Gehalte, die von den Sickerwasserwerten weit entfernt liegen (z. B. Blei bei Bleihüttengranulat: 94 mg/l gegenüber 3,5 µg/l im Sickerwasser). Verallgemeinert werden darf diese Aussage jedoch

nicht, da die DIN-Verfahren abhängig von Material und Element sehr unterschiedliche Werte ergeben und den Sickerwassergehalt nicht annähernd richtig vorhersagen. Ansatzweise gelingt das bei den geprüften Materialien nur bei den Elementen Molybdän (Abbildung 1 links) und Antimon.

Während der S4-Versuch die Sickerwassergehalte oftmals unterschätzt, ergeben die anderen beiden Methoden häufig zu hohe Ergebnisse. Als Beispiel hierfür kann das Element Kupfer dienen (Abbildung 1 rechts).

Elution mit einem Fest-Flüssig-Verhältnis von 1:2

Die Konzentrationen im wässrigen Extrakt mit einem Fest-Flüssig-Verhältnis von 1:2 liegen meist etwas über denen des S4-Versuchs. Meist liegen die Verhältnisse zwischen 1 und 5 mit einzelnen Ausreißern nach oben. Die einzelnen Elemente und Materialien reagieren unterschiedlich auf das geänderte Fest-Flüssig-Verhältnis.

Aufgrund der höheren Werte ergeben sich im Vergleich zum S4-Versuch zusätzliche Prüfwertüberschreitungen. Bei den Bankettschälgütern betrifft dies Kupfer (Landstraße) sowie Antimon (Autobahn). Das Referenzmaterial Bauschutt zeigt zusätzliche Prüfwertüberschreitungen bei Kupfer und Molybdän. Ebenfalls Kupfer sowie Nickel liegen im 1:2-Extrakt des Kehrortes oberhalb der Prüfwerte. Arsen stellt ein Problem im Eluat des Waldoberbodens dar, Cadmium ist beim sandbürtigen Ackerboden erhöht.

Ein Vergleich der Ergebnisse des 1:2-Extraktes mit dem Bodensättigungsextrakt ergibt, dass eine Herabsetzung des Fest-Flüssig-Verhältnisses eine Annäherung der Ergebnisse beider Verfahren bewirkt. Die Werte im Bodensättigungsextrakt liegen jedoch weiterhin fast durchweg über denen des wässrigen Extraktes.

Die Elution mit einem Fest-Flüssig-Verhältnis von 1:2 liefert ebenfalls keine einigermaßen genaue Abschätzung der Sickerwassergehalte. Im Vergleich zum S4-Versuch kommt es zwar bei einigen Elementen wie Chrom und Molybdän zu einer leichten Verbesserung der Prognose, bei anderen, etwa Blei, ist keine nennenswerte Verbesserung feststellbar. Die Tendenz zur Unterschätzung der Sickerwassergehalte wird zwar abgeschwächt, teilweise aber umgekehrt.

Bewertung und Diskussion der Quellstärkebestimmung im Labor

Die vorliegenden Ergebnisse zeigen, dass die gängigen DIN-Verfahren die Quellstärke der untersuchten Materialien nicht akzeptabel vorhersagen können. Auch eine regelhafte Abweichung zwischen Labor- und Lysimeterergebnissen ist nicht ersichtlich. Eine Hochrechnung zu erwartender Schadstoffausträge unter Freilandbedingungen scheidet damit aus.

Damit decken sich die Ergebnisse der vorliegenden Untersuchungen mit denen anderer Autoren (u.a. SCHEITHAUER und BERGER, 2004). Eine Prognose,

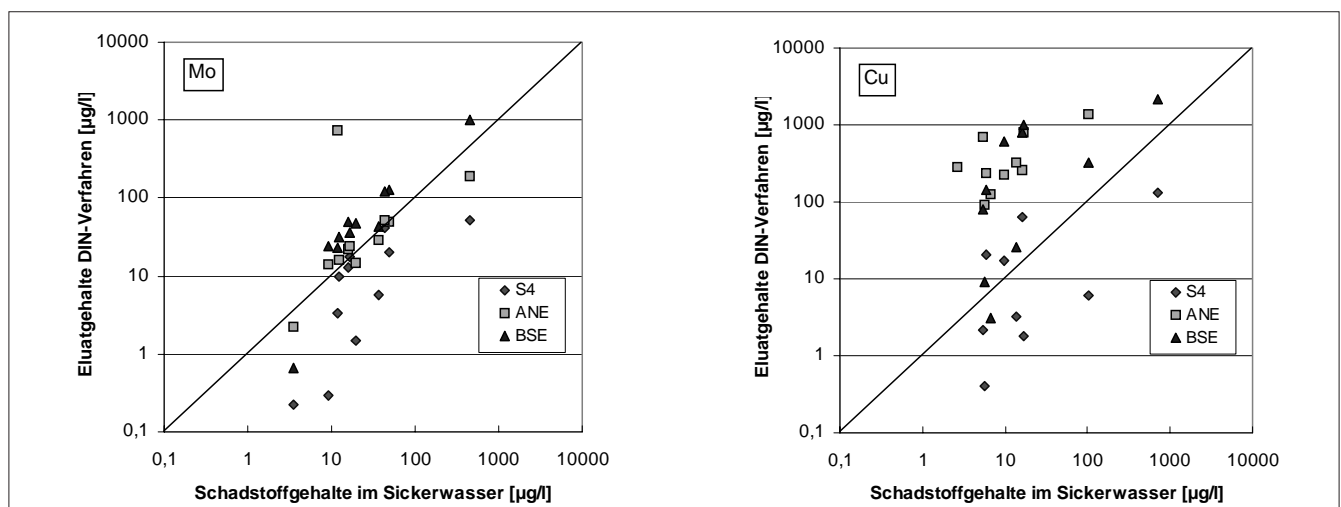


Abbildung 1: Vergleich von Molybdän und Kupfer im Sickerwasser und im Eluat der DIN-Verfahren

welches Verfahren die unter natürlichen Gegebenheiten zu erwartenden Konzentrationen im Sickerwasser schadstoffhaltiger Materialien am besten vorhersagt, kann aufgrund bisher vorliegender Forschungsergebnisse nicht gemacht werden. Problematisch ist auch, dass neben einer häufig auftretenden Überschätzung der Gefährdung Fälle auftreten, in denen trotz Unterschreitung der Prüf- und Vorsorgewerte das reale Gefährdungspotential unterschätzt wird (NARIMANIDZE et al., 2003). Der Aussage von GERTH (2001:306), der die "nach BBodSchV zur Bestimmung der Quellkonzentration für anorganische Schadstoffe vorgesehenen Laborverfahren als nicht ausgereift" ansieht, kann somit zugestimmt werden.

Die Ursachen für ein Versagen der Verfahren sind vielfältig, ebenso die Vorschläge für Alternativen. Neben mangelnder Praktikabilität (BSE bei groben Materialien) wird häufig die fehlende Naturnähe der Laborverfahren bemängelt (LANG und KAUPENJOHANN, 2003). Die Einflussfaktoren auf die Löslichkeit eines Stoffes sind zahlreich.

VAN DER SLOOT (1996) sieht das W/F-Verhältnis und den pH-Wert als Haupteinflussgrößen auf die Lösung. Für GERTH (2001) spielen ebenso Temperatur und Redox-Potenzial, dabei besonders der CO₂-Partialdruck eine bestimmende Rolle. Hinzu kommt die Fließgeschwindigkeit bzw. die Verweilzeit des Sickerwassers, die von Größe und Verteilung der Poren eines Materials beeinflusst wird (DURNER, 2001). Die genannten Faktoren sind zum Großteil zeitlich nicht konstant, was eine Simulation im Labor zusätzlich erschwert. Zudem wirken sich die Probenvorbehandlung sowie die mechanische Beanspruchung während der Extraktion negativ auf das Ergebnis aus. Gleiches gilt für die unterschiedliche Dauer der Extraktionen. Im Freiland sind "Ungleichgewichtsbedingungen ... von großer Bedeutung für die Freisetzung vieler Schadstoffe", und die Löslichkeit vieler Stoffe unterliegt "einer hohen zeitlichen und räumlichen Dynamik" (LANG und KAUPENJOHANN, 2003). Zudem seien mit den gängigen Verfahren keine Aussagen über die Freisetzungskinetik eines Stoffes möglich. Damit kann nichts

über dessen Nachlieferbarkeit gesagt werden.

Ein weiteres Problem ist die Nichtbeachtung des kolloidalen Transportes (KRETZSCHMAR et al., 1999). Auch bei den hier ausgewerteten Lysimeterversuchen wurden die Kolloide vor der Analytik durch Filtration zurückgehalten. Hier wäre möglicherweise eine wie auch immer geartete Untersuchung des Filterinhaltes zu entwickeln.

Zur Behebung der angesprochenen Defizite werden von verschiedenen Autoren alternative Verfahren vorgeschlagen. SCHEITHAUER und BERGER (2004) favorisieren eine Extraktion mit einem Fest-Flüssig-Verhältnis von 1:1, methodisch angelehnt an den Bodensättigungsextrakt. Damit sollen dessen relative Naturnähe und der Vorteil geringer mechanischer Beanspruchung genutzt werden und das Verfahren auch auf grobe Materialien anwendbar sein. Zudem soll die Reproduzierbarkeit verbessert werden.

GERTH (2001:306) schlägt eine Säulenelution vor. Das Prüfmateriale soll wassergesättigt in fester Position gehalten und nur das Elutionsmittel bewegt werden, der CO₂-Partialdruck soll kontrollier- und anpassbar sein. Das Eluat wird dabei kontinuierlich am Säulenende über eine Membran abgesaugt.

Um sowohl eine Aussage über das Auslaugverhalten unter naturnahen Verhältnissen als auch über das Mobilisationsverhalten treffen zu können, entwickelten OBERMANN und CREMER (1990) bzw. CREMER (1991) das pH-stat-Verfahren. Bei einer 24-stündigen Elution ähnlich dem S4-Versuch wird der pH-Wert auf einem konstanten Wert gehalten. Es sollen dadurch die sich langfristig auf einer Deponie einstellenden Verhältnisse simuliert werden. Jedoch wird bei dieser Methodik keine Aussage über Kinetik und Mobilisierungspotential gemacht, da sich Schadstoffe anreichern. Dies wird von LANG und KAUPENJOHANN (2003) bemängelt und gleichzeitig ein Konzept des Mobilisierungspotentials gefordert mit dem Ziel die "Schadstoffnachlieferbarkeit aus der Festphase" zu ermitteln. Diesen Ansatz verfolgt die "infinite Sink-Extraktion", die mit einer Ionensenke arbeitet: Durch Adsorption an einen Austauschwer-

den freigesetzte Ionen der Boden-Wasser-Suspension entzogen. Eine Weiterentwicklung bzw. Verknüpfung mit der pH-stat-Methode kommt von KAUPENJOHANN und WILCKE (1995). Neben dem ständigen Entzug freigesetzter Ionen wird die Lösung durch Titration ständig auf konstantem pH-Wert gehalten. GERTH (2001) erwähnt mit dem Schweizer TVA-Test eine weitere Möglichkeit, das Mobilisierungspotential zu erfassen. Das erwähnte Verfahren arbeitet unter ständig CO₂-gesättigten Bedingungen.

Die Vielfalt der Prozesse und Faktoren, die die Lösung und Freisetzung von Schadstoffen steuern, machen es wenig wahrscheinlich, dieses komplexe System durch ein einziges Labor-Verfahren simulieren zu können. Das zeigt auch schon die große Anzahl bisher entwickelter und angewandter Verfahren, die alle einzelne Stärken aber auch jeweils Defizite aufweisen. Die Anwendung mehrerer Methoden, die einzeln auf initiales sowie dauerhaftes Lösungsverhalten und das Mobilisierungspotenzial ausgerichtet sind, scheint daher sinnvoll.

Literatur

- BIELERT, U., 1999: Hydrogeochemie von Spurenelementen in Sicker-, Grund- und Trinkwässern - von der Sickerwasserpassage bis zur Aufbereitung. Diss. Geochem. Inst. Göttingen.
- CREMER, S., 1991: Mobilisierung von Schwermetallen in Porenwässern von belasteten Böden und Deponien: Entwicklung eines aussagekräftigen Elutionsverfahrens. Diss. Univ. Bochum.
- DURNER, W., 2001: Sickerwasserprognose aus naturwissenschaftlicher Sicht. TU Braunschweig: www.soil.tu-bs.de/mitarbeiter/durner/public/01_GAB.pdf.
- GERTH, J., 2001: Quelltermittlung für anorganische Schadstoffe unter simulierten in situ-Verhältnissen. Altlastenspektrum 6/2001: 305-309.
- HORNBERG, V., 2002: Vergleich von Methoden zur Bestimmung der Gesamtgehalte von Haupt- und Spurenelementen in Böden. Geologischer Dienst Nordrhein-Westfalen, http://www.gd.nrw.de/zip/a_pjb02.pdf.
- KAUPENJOHANN, M. und W. WILCKE, 1995: Untersuchungen zur pH-Pufferkinetik von Böden mit einer neuen pH-stat-Technik. Mitteilungen der Dtsch. Bodenk. Gesellsch. 76:1441-1444.
- KRETZSCHMAR, R., M. BORKOVEC, D. GROLIMUND und M. ELIMELECH, 1999: Mobile surface colloids and their role in containment transport. Adv. in Agronomy 66: 121-181.
- LANG, F. und M. KAUPENJOHANN, 2003: Quellstärkeermittlung für die Sickerwasserprognose: Chancenlose Jagd nach dem falschen Ziel? Altlastenspektrum 2/2003: 80-86.

- NARIMANIDZE, E., D. STEFFENS, S. SCHUBERT, L. WIECHMANN und P. FELIX-HENNINGSSEN, 2003: Bergbaubedingte Schwermetallbelastung und Bioverfügbarkeit der Schwermetalle in Kastanozernen eines Bewässerungsgebiets südlich von Tiflis/Georgien. Mitt. Deutsch. Bodenk. Gesellsch. 102: 219-220.
- OBERMANN, P. und S. CREMER, 1990: Entwicklung eines Routinetests zur Elution von Schwermetallen aus Abfällen und belasteten Böden. -Abschlußbericht des ersten Teilprojekts, 86 S.; Bochum.
- SCHEITHAUER, M. und W. BERGER, 2004: Vergleich verschiedener Elutionsmethoden der BBodSchV an ausgewählten Altlastenstandorten mit Lysimeteruntersuchungen. Altlastenspektrum 4/2004: 203-213.
- VAN DER SLOOT, H.A., 1996: Developments in evaluating environmental impact from utilization of bulk inert wastes using laboratory leaching testes and field verification. Waste Management 16.1-3: 65-81.
- DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG, DIN 38414-7, (S7), DIN 38414-4, (S4), DIN 19730, DIN V 19730 Anhang A.2.
- Das zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 02WP0205 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt liegt bei den Autoren.