

Kurzbericht zum Forschungsvorhaben „Umweltverträglichkeit von Recyclingmaterialien - Ansätze zur Bewertung im Hinblick auf die Verwendung als Betonzuschlag“ - F469

1 EINLEITUNG

Für Bauabfälle (Bauschutt, Baustellenabfälle, Straßenaufbruch und Bodenaushub) gilt das sogenannte Verwertungsgebot. Dieses endet erst, wenn die Verwertung technisch nicht möglich oder unwirtschaftlich bzw. eine Deponierung umweltverträglicher wäre. Der Gesetzgeber fordert daher eine umweltverträgliche Verwertung. Dabei versteht man unter dem Begriff der Umweltverträglichkeit allgemein die Wechselwirkungen eines Stoffes oder Produktionsverfahrens mit den Schutzgütern Wasser, Boden und Luft. Damit das Ziel einer umweltverträglichen Verwertung erreicht werden kann, müssen sich alle Beteiligten zunächst darüber einig sein, nach welchen Kriterien die Umweltverträglichkeit objektiv zu beurteilen ist.

Der vorliegende Forschungsbericht gibt aufgrund einer umfangreichen Literaturlauswertung und anhand eigener Untersuchungen Informationen darüber, wie derzeit die Umweltverträglichkeit mineralischer Recyclingbaustoffe allgemein beurteilt wird und welche Beurteilungskriterien im Hinblick auf die Verwertung solcher Produkte als Betonzuschlagstoff sinnvoll erscheinen.

2 KRITERIEN UND KONZEPTE ZUR BEURTEILUNG DER UMWELTVERTRÄGLICHKEIT

Da mineralischer Bauschutt nach entsprechender Aufbereitung bislang überwiegend im Straßen und Wegebau als Bettungs- und Verfüllstoff eingesetzt wurde, existieren in den einzelnen Bundesländern verschiedenste Regelwerke zur Beurteilung der Umweltverträglichkeit solcher Produkte im Hinblick auf den o. g. Anwendungsbereich. Alle Regelwerke ordnen die Produkte über Grenzwerte, die sich für umweltrelevante Stoffe anorganischen und organischen Ursprungs aus Feststoff oder Eluatanalysen, i. d. R. nach Elution mit dem modifizierten DEV-S4-Verfahren, ergeben, entsprechenden Einsatzklassen zu. Diese Einsatzklassen sind spezifisch für die Anwendungsfälle im Straßen- und Wegebau. Länderübergreifend existiert in diesem Bereich bislang ein Arbeitspapier der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen /1/ im Entwurf, über das Analyseverfahren und Grenzwerte vereinheitlicht werden sollen.

Um sicherzustellen, daß es in den einzelnen Bundesländern nicht zu einer unterschiedlichen Beurteilung und Behandlung bei der Verwertung von Reststoffen/Abfällen kommt und um die derzeit bereits vorhandenen Ansätze in den einzelnen Rechtsbereichen aufeinander abzustimmen und zu vereinheitlichen, wurden von der Bund/Länder-Arbeitsgruppe „Vereinheitlichung der Untersuchung und Bewertung von Reststoffen“ der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) „Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Reststoffen/Abfällen - Technische Regeln“ erstellt, die auch Anforderungen an die stoffliche Verwertung von Bauschutt behandeln. Diese Technischen Regeln liegen bislang als Empfehlung vor und es ist nun Aufgabe der Bundesländer, diese umzusetzen. Aus Vorsorgegründen werden dort Anforderungen an die Verwertung mineralischer Reststoffe/Abfälle gestellt, die auf eine Aufbringungsbeschränkung umweltrelevanter Stoffe abzielen. Auf diese Weise soll sichergestellt werden, „daß diese Stoffe nicht auf dem Wege der Verdünnung oder der unspezifischen Einbindung gezielt oder als Nebeneffekt einer Verwertung in den Naturhaushalt eingeschleust werden“ /2/. Diese Grenzwerte orientieren sich weder an der

Verwendung als Betonzuschlag, noch an den Freisetzungsraten von Baustoffen unter Verwendung dieser Reststoffe unter realen Bedingungen im Vergleich mit jahrelang bewährten Stoffen (z. B. Beton mit Recyclingzuschlägen im Vergleich zu Beton mit Kies/Sand).

3 UNTERSUCHUNGEN UND ERGEBNISSE

Im Rahmen dieses Projektes wurden Recyclingmaterialien aus einer Aufbereitungsanlage für gemischten mineralischen Bauschutt sowie im Labor hergestellter Betonsplitt untersucht. Die Untersuchungen hatten zum Ziel, das Auslaugverhalten mineralischer Recyclingmaterialien sowie daraus hergestellte Mörtel und Betone zu untersuchen.

Um ausreichende Informationen über das Auslaugverhalten von Schwermetallen zu erhalten, wurden folgende Verfahren zur Untersuchung gewählt:

- die Bestimmung des Gesamtgehalts an Spurenelementen sowie die Eluierbarkeit unter extremen Bedingungen zur Charakterisierung der Proben (Korngröße < 125 µm, pH = 4),
- Eluierbarkeit nach dem modifizierten DEV-S4-Verfahren (Elution in der ursprünglichen Korngröße - vgl. z. B. /3/),
- die Bestimmung der Auslaugraten unter praxisrelevanten Bedingungen.

Darüber hinaus wurden organische Parameter an den Recyclingmaterialien aus gemischtem mineralischen Bauschutt am Feststoff sowie nach Elution nach dem modifizierten DEV-S4-Verfahren an den Eluaten bestimmt.

Zur Untersuchung wurden die in Tabelle 1 aufgeführten Materialien ausgewählt.

Tabelle 1: Untersuchte Recyclingmaterialien aus aufbereitetem Bauschutt

Material	Kurzbezeichnung
1	2
Brechsand 0/5 mm, Ausgangsmaterial B , ungewaschen (ug)	0/5-B-ug
Brechsand 0/5 mm, Ausgangsmaterial G , ungewaschen (ug)	0/5-G-ug
Körnung 5/45 mm, Ausgangsmaterial G , ungewaschen (ug)	5/45-G-ug
Sand 0/2 mm, Ausgangsmaterial G , gewaschen aus Vorsieb 0/8 mm (g)	0/2-G-g
Sand 0/2 mm, Ausgangsmaterial G , gesiebt aus Vorsieb 0/8 mm (ug)	0/2-G-ug

In der hier beprobten Anlage werden die angenommenen Materialien vor der Aufbereitung grundsätzlich auf zwei Halden zwischengelagert. Auf einer Halde werden Betonbruch, Natursteine, Kies, Schotter und Sand (**Ausgangsmaterial B**), auf der anderen Mauerwerk, Abbruch aller Arten, Gemische von Mauerwerk und Beton, Leichtbeton und Bauschuttgemische mit allen Arten von Böden gelagert (**Ausgangsmaterial G**). Zur Herstellung der Recyclingmaterialien wird die Anlage wahlweise von einer der Halden beschickt. Die Beeinflussung des Auslaugverhaltens durch den Waschprozeß (Aquamator) wurde an gewaschenem (**g**) und ungewaschenen (**ug**) Recyclingsand 0/2 mm aus der Vorabsiebung der Anlage untersucht. Durch den Vergleich des Elutionsverhaltens von Brechsand 0/5 mm und Körnung 5/45 mm wurde untersucht, ob sich im vorliegenden Fall

umweltrelevante Stoffe verstärkt in der feineren Fraktion anreichern und ob diese sich in ihrer Mobilisierbarkeit unterscheiden.

Zur Herstellung von Betonsplitt mit Schwermetallgehalten in der Größenordnung praxisüblicher Betone wurde im Labor ein Ausgangsbeton (B1) unter Zudotierung leicht löslicher Schwermetallsalze hergestellt.

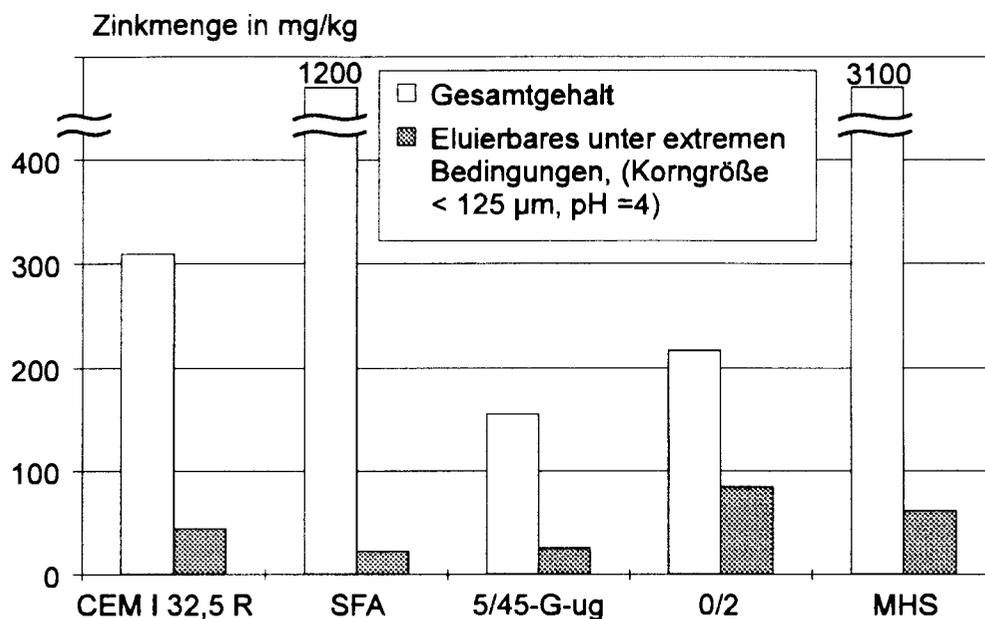


Bild 1: Unter extremen Bedingungen eluierbare Mengen an Zink im Vergleich zum Gesamtgehalt an Zink; Verschiedene Betonausgangsstoffe - Zement (CEM I 32,5 R), Steinkohlenflugasche (SFA) /4/, Recyclingmaterial 5/45-G-ug, Betonbrechsand 0/2, Metallhüttenschlacke (MHS) /4/

Ein Vergleich des unter extremen Bedingungen Eluierbaren mit den jeweiligen Gesamtgehalten der Proben zeigt, daß trotz der großen Oberfläche, die bei diesem Verfahren für die Auslaugungsvorgänge zur Verfügung steht, von den in den Proben vorhandenen Schwermetallgehalten lediglich ein gewisser Anteil mobilisiert werden kann. In Bild 1 sind die Ergebnisse für den verwendeten Zement (CEM I 32,5 R), das Recyclingmaterial 5/45-G-ug, den im Labor erzeugten Betonbrechsand 0/2, eine Steinkohlenflugasche (SFA) sowie eine Metallhüttenschlacke (MHS) aus /4/ dargestellt. Hierbei ist anzumerken, daß die Metallhüttenschlacke derzeit nicht als Betonzuschlag zugelassen ist.

Nachdem die Recyclingmaterialien auch bei unterschiedlichen Schwermetall-Gesamtgehalten keine signifikanten Unterschiede in den eluierbaren Mengen unter extremen Bedingungen und im Auslaugverhalten nach dem modifizierten DEV-S4-Verfahren aufwiesen (vgl. Tabelle A1), wurde am Material 0/2-G-g beispielhaft das Auslaugverhalten im Hinblick auf die Verwendung als Betonzuschlagstoff im Standtest untersucht (Mörtel M1). Standtests an Betonprobekörpern wurden am „dotierten Beton“ B1 und am mit Betonsplitt hergestellten Beton B2 durchgeführt. Die Ergebnisse der Untersuchungen sind in der Tabelle A2 zusammen- und Ergebnissen aus /4/ gegenübergestellt.

In Bild 2 sind die Ergebnisse aus Tabelle A2 am Beispiel von Kupfer für verschiedene Mörtel- und Betonmischungen dargestellt. Die Gegenüberstellung der im Standtest über den Versuchszeitraum von 56d ausgelaugten Mengen mit den Gesamtgehalten zeigt, daß weniger der Gesamtgehalt an Schwermetallen entscheidend für die Auslaugung ist, sondern vielmehr, wie die Schwermetalle in die Mörtelmatrix eingebunden werden (physikalische und chemische Einbindung).

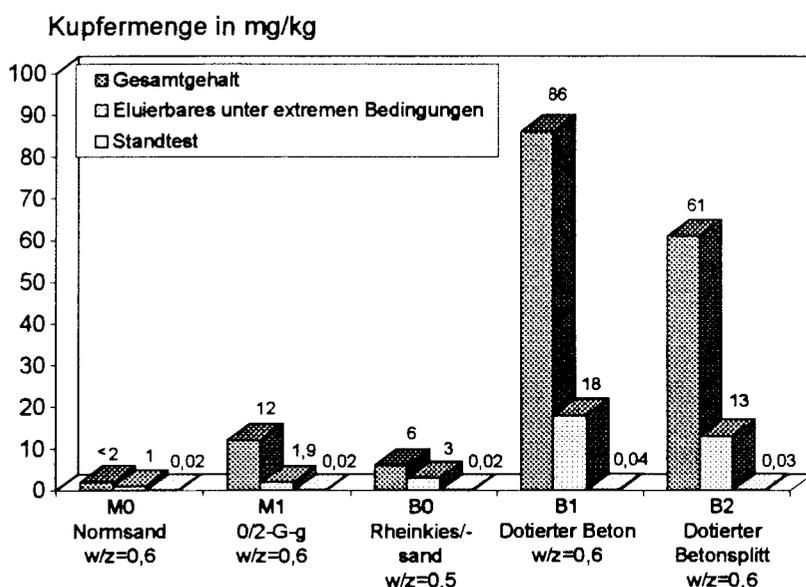


Bild 2: Untersuchungsergebnisse aus Standtests mit Mörtel- und Betonprüfkörpern - Beispiel Kupfer

In den praxisrelevanten Auslaugtests werden zunächst die Freisetzungsraten J der Schwermetalle bestimmt. Liegt Diffusion als dominierender Auslaugmechanismus vor (Steigung im $\lg J$ - $\lg t$ -Diagramm $(-0,5 \pm 0,05)$), kann die durch Diffusion nach 1 Jahr ausgelaugte Stoffmenge (E_{1a}) berechnet werden (Gleichung (2)). Um E_{1a} zu erhalten, wird die aktuelle Freisetzungsrate (Freisetzungsrate durch Diffusion während des Auslaugversuches) auf die nach einem Jahr mit dieser Rate freigesetzte Menge umgerechnet. Der Umrechnung liegt zugrunde, daß im diffusionskontrollierten Bereich die Freisetzungsrate J einem \sqrt{t} -Gesetz gehorcht. In einem J - \sqrt{t} -Diagramm ergibt sich für diesen Bereich eine konstante Steigung und für $J_{D,t}$ gilt die Beziehung der Gleichung (1).

$$J_{D,t} = \sqrt{\frac{D_{eff} \cdot S_a^2}{\pi \cdot t}} = \frac{F}{\sqrt{t}} \quad (1)$$

$$\Rightarrow E_{1a} = J_{D,t} \cdot M \cdot 5616 \quad (2)$$

mit:

- $J_{D,t}$: durch Diffusion verursachter Stofftransport zum Zeitpunkt t [$\text{mmol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$] (wird aus den Versuchsergebnissen berechnet)
 D_{eff} : effektiver Diffusionskoeffizient der Ionen [m^2/s]
 F : Auslaugkoeffizient F [$\text{mmol}/\text{m}^2 \cdot \sqrt{s}$]
 S_a : mobilisierbare Konzentration
 E_{1a} : nach 1 Jahr durch Diffusion freigesetzte Stoffmenge [$\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$]
 M : Molgewicht der betrachteten Ionenart [mg/mmol]
 t : Zeitraum während der Elution, in dem Diffusion vorliegt (Steigung im $\lg J$ - $\lg t$ -Diagramm = -0,5) [s]
 5616: $\sqrt{\text{Sekunden pro Jahr}}$

Bei der Bewertung von E_{1a} muß beachtet werden, daß es sich um errechnete Emissionen aufgrund der Diffusion während des Auslaugversuches handelt. Dies sind nicht die Emissionen, die in der Praxis tatsächlich freigesetzt werden. Zementgebundene Baustoffe werden mit zunehmenden Alter aufgrund fortschreitender Hydratation immer dichter, d. h. die Emission durch Diffusion wird mit zunehmenden Betonalter geringer. Dieser Einfluß wird bei der Berechnung von E_{1a} nicht berücksichtigt. Daher liegen die E_{1a} -Werte, die an Proben im Labor bestimmt werden, über den Emissionen in der Praxis und damit auf der sicheren Seite. Die E_{1a} Werte dienen zum Vergleich verschiedener zementgebundener Baustoffe untereinander.

Tabelle 2: In Standtests mit Mörtelprismen ermittelte Emissionen nach einem Jahr E_{1a}

Probe		Zuschlag	w/z	Natrium	Chrom	Zink	Kupfer	Blei
				$\text{mg}/\text{m}^2 \cdot \text{a}$				
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Mörtel	M0 ²⁾	Normsand	0,6	6054	3,0	3,0 ¹⁾	3,5	2,1
	M1	RC-Sand 0/2-G-g	0,6	4501	2,8	3,0 ¹⁾	2,0	0,8

1) nicht eindeutig Diffusion

2) Ergebnisse aus /4/

Ein Vergleich der Emissionen nach einem Jahr E_{1a} (Tabelle 2) zeigt z. B. für den Mörtel M0 mit Normsand und M1 mit RC-Sand 0/2-G-ug keine signifikanten Unterschiede. Dies ist auf die geringen Unterschiede in der Mobilisierbarkeit der betrachteten Elemente aus den Mörteln zurückzuführen. Die unter extremen Bedingungen mobilisierbaren Anteile der Elemente Chrom, Zink, Kupfer und Blei zeigen keine wesentlichen Unterschiede (vgl. Tabelle A2).

4 ZUSAMMENFASSUNG

Die Untersuchungsergebnisse belegen, daß die Auslaugung von Schwermetallen aus zementgebundenen Baustoffen weitgehend unabhängig von der vorhandenen Menge dieser Bestandteile im Baustoff ist, solange sich diese in einem für Betonausgangsstoffe bekannten und üblichen Rahmen bewegen. Dies gilt gleichermaßen für Mörtel und Betone unter Verwendung natürlicher Zuschläge wie auch unter Verwendung von Recyclingzuschlägen aus aufbereitetem mineralischem Bauschutt bzw. von Betonsplitt. Ob diese Aussagen auch auf organische Parameter

übertragen werden können, konnte im Rahmen dieses Forschungsprojektes nicht geklärt werden. Verschiedene Ergebnisse aus der Literatur deuten aber darauf hin, daß zumindest für einige Parameter davon ausgegangen werden kann.

Darüber hinaus wurde die Annahme bestätigt, daß sich bei der Aufbereitung von Altbeton zu Betonsplitt mit der Anreicherung von Zementstein in den feineren Fraktionen dort auch Schwermetalle anreichern (Gesamtgehalte). Die Mobilisierbarkeit der Schwermetalle wächst aber nicht in gleichem Maße.

Da derzeit in Deutschland kein genormtes oder vorgeschriebenes Verfahren vorhanden ist, mit dem das Auslaugverhalten von zementgebundenen Baustoffen geprüft werden kann und somit auch noch kein stoff- und einsatzklassenbezogenes Bewertungsschema für Recyclingmaterialien in zementgebundenen Baustoffen vorliegt, ist momentan zu empfehlen, bei der Bewertung von Recyclingmaterialien als Betonzuschlag (z. B. im Rahmen von Zulassungsuntersuchungen) im Hinblick auf den Vorsorgegedanken und einer vereinheitlichten Vorgehensweise übergangsweise nach den Technischen Regeln „Bauschutt“ der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) vorzugehen. Maßgebend sollte dann der Zuordnungswert Z2 sein.

5 LITERATUR

- /1/ Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen; FGSV-Arbeitspapier 28/1: Umweltverträglichkeit von Mineralstoffen Teil 1: Wasserwirtschaftliche Verträglichkeit. Köln: Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, 1994
- /2/ Bertram, H.-U.; Zubiller, C.-O.: Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Reststoffen/Abfällen. In: TerraTech (1995), Nr. 5, S. 26-30
- /3/ Länderarbeitsgemeinschaft Abfall; LAGA: Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Reststoffen/Abfällen. Technische Regeln. Stand 11.95
- /4/ Schießl, P.; Hohberg, I.: Umweltverträglichkeit von zementgebundenen Baustoffen - Untersuchungen zum Auslaugverhalten. Aachen: Institut für Bauforschung, 1995. - Forschungsbericht Nr. F 414

6 TABELLEN

Tabelle A1: Charakterisierung der untersuchten Recyclingmaterialien; Gesamtgehalte, Eluierbares unter extremen Bedingungen und modifiziertes DEV-S4-Verfahren

Bestandteil	0/5-B-ug			0/5-G-ug			5/45-G-ug			0/2-G-g			0/2-G-ug		
	Ge- samt- gehalt	Eluier- bares ¹⁾	modif. DEV- S4 ²⁾												
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Arsen	14	0,1	<0,01	12	0,1	0,01	8	0,1	<0,01	5	0,1	<0,02	11	0,2	0,01
Thallium	0,11	n. b.	<0,01	0,1	n. b.	<0,01	0,1	n. b.	<0,01	0,05	n. b.	<0,01	0,1	n. b.	<0,01
Chrom	50	0,9	0,38	48	0,9	0,43	67	0,6	0,31	36	0,4	0,05	36	0,5	0,09
Zink	73	32	0,06	99	38	0,1	155	25	0,01	82	29	0,06	120	50	0,06
Antimon	<5	n. b.	n. b.												
Blei	34	2,1	0,06	73	2,3	0,05	265	0,9	0,01	53	2,4	0,06	105	4,4	0,03
Kobalt	58	72	n. b.	33	38	n. b.	33	27	n. b.	51	70	n. b.	38	41	n. b.
Cadmium	<2	n. b.	<0,01												
Quecksilber	0,05	n. b.	<0,01	0,1	n. b.	<0,01	<0,005	n. b.	<0,01	0,005	n. b.	<0,01	0,2	n. b.	<0,01
Nickel	24	5,3	0,05	19	3,4	0,1	30	2,9	0,01	13	1,8	0,02	15	1,4	0,03
Barium	355	48	n. b.	445	40	n. b.	424	35	n. b.	424	24	n. b.	441	31	n. b.
Kupfer	38	10	0,51	16	2	0,35	10	1	0,06	44	4	0,11	16	2	0,19
Wismuth	<5	n. b.	n. b.												
Gallium	6	n. b.	n. b.	6	n. b.	n. b.	7	n. b.	n. b.	6	n. b.	n. b.	6	n. b.	n. b.

1) fein aufgemahlenes Material (< 125 µm), niedriger pH-Wert (pH = 4)

2) Ergebnisse des modifizierten DEV-S4-Verfahrens (Elution des Materials in der angelieferten Korngröße)

n. b.: nicht bestimmt

Tabelle A2: Ergebnisse der Untersuchungen von Beton-/Mörtelproben; Gesamtgehalt, Eluierbares unter extremen Bedingungen sowie Ergebnisse aus praxisorientierten Untersuchungen (Standtests)

Prüfgröße	Beton B0 ¹⁾			Beton B1			Beton B2			Mörtel M0 ¹⁾			Mörtel M1		
	Gesamtgehalt	Eluierbares ²⁾	Standtest ³⁾	Gesamtgehalt	Eluierbares ²⁾	Standtest ³⁾	Gesamtgehalt	Eluierbares ²⁾	Standtest ³⁾	Gesamtgehalt	Eluierbares ²⁾	Standtest ³⁾	Gesamtgehalt	Eluierbares ²⁾	Standtest ³⁾
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
	mg/kg														
Arsen	4	0,1	<0,01	5	0,2	n. b.	9	<0,1	n. b.	5	1	n. b.	6	<0,1	n. b.
Thallium	0,5	0,1	n. b.	0,05	0,1	n. b.	0,1	n. b.	n. b.	0,2	0,1	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.
Chrom	21	3,3	0,02	15	3,8	0,13	27	7,59	0,19	27	8	0,04	45	5,72	0,03
Zink	117	52	0,13	166	99	0,14	175	70	0,04	133	50	0,32	86	46	0,04
Antimon	n. b.	n. b.	n. b.	2	n. b.	n. b.	<0,5	n. b.	n. b.	15	n. b.	n. b.	2	n. b.	n. b.
Blei	25	0,7	<0,03	97	24	0,02	73	6,6	0,02	n. b.	1	0,03	38	1,8	0,03
Kobalt	2	1	n. b.	61	80	n. b.	29	n. b.	n. b.	23	12	n. b.	53	n. b.	n. b.
Cadmium	<0,5	<0,1	<0,01	<5	0,5	n. b.	0,2	n. b.	n. b.	0,5	0,1	n. b.	0,1	n. b.	n. b.
Quecksilber Hg	<0,1	<0,1	n. b.	<0,01	<0,1	n. b.	0,06	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	<0,1	n. b.	n. b.
Nickel	11	8	n. b.	5	5,2	n. b.	13	n. b.	n. b.	13	3	n. b.	13	n. b.	n. b.
Barium	172	50	n. b.	152	61	n. b.	212	n. b.	n. b.	220	51	n. b.	355	n. b.	n. b.
Kupfer	6	3	0,02	86	18	0,04	61	13	0,03	<2	1	0,02	12	1,9	0,02
Wismuth	n. b.	n. b.	n. b.	0	<3	n. b.	3	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	<1	n. b.	n. b.
Gallium	n. b.	n. b.	n. b.	3	n. b.	n. b.	3	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	5	n. b.	n. b.

1) /3/

2) fein aufgemahlenes Material (< 125 µm), niedriger pH-Wert (pH = 4)

3) ausgelaugte Mengen nach 56 d und 8maligem Eluentenaustausch

n. b. : nicht bestimmt