



Umweltrelevante Eigenschaften von Schlacken aus Müllverbrennungsanlagen

1 Einleitung

Der Hauptprozessabfall der thermischen Behandlung von Siedlungsabfällen ist Rostschlacke. In Bayern fielen im Jahr 2002 ca. 601.000 Mg Müllverbrennungsschlacke (MV-Schlacke) an, wovon ca. 483.000 Mg (80,4 Mass.-%) verwertet, der Rest deponiert wurden [1]:

- 56.358 Mg Metallschrott (9,4 Mass.-%; überwiegend Eisen, Kupfer, Messing und Aluminium) wurden aus der Rohschlacke abgetrennt;
- 426.590 Mg (entschrottete) Rohschlacke (71,0 Mass.-%) wurden einer Verwertung als Baustoff oder Versatzmaterial unter Tage zugeführt.

MV-Schlacke findet als Sekundärbaustoff Einsatz insbesondere im

- Straßen- und Wegebau, bei der Anlage befestigter Flächen im Industrie- und Gewerbebau (z.B. Parkplätze, Lagerflächen), bei sonstigen Verkehrsflächen (z.B. Flugplätze, Hafengebiete, Güterverkehrszentren) als
 - Tragschicht unter wasserundurchlässigen Deckschichten (z.B. Beton, Asphalt, Pflaster),
 - gebundene Tragschicht unter wenig durchlässigen Deckschichten (z.B. Pflaster, Platten);
- Erdbau in hydrogeologisch geeigneten Gebieten als
 - Lärmschutzwand,
 - Straßendamm mit wasserundurchlässiger Fahrbahndecke,jeweils mit mineralischer Oberflächenabdichtung und darüber liegender Rekultivierungsschicht.

Bei all diesen Verwertungsmöglichkeiten steht die Umweltverträglichkeit der durchgeführten Maßnahmen im Vordergrund. Dies findet auch Eingang in die vielfältigen Verordnungen, die eine umweltgerechte Verwertung von MV-Schlacke regeln.

2 Rechtlicher Rahmen der Schlackeverwertung

Zur Schonung von natürlichen Rohstoffen, Deponievolumen sowie von Naturhaushalt und Landschaftsbild kommen verstärkt alternative Stoffe im Bauwesen zum Einsatz, zu denen auch MV-Schlacke zählt. Eine Vielzahl von Vorschriften und technischen Regeln - aus Sicht der Schlackeherzeuger [2], [3] bzw. -verwerter (z.B. im Straßenbau [4], [5]) - dient einer umweltgerechten Schlackeverwertung. Die diversen Regelwerke definieren unterschiedliche Anforderungen an die umwelt- und verwertungsrelevanten Eigenschaften. Aus wasserwirtschaftlicher Sicht ist die Schlackeverwertung in Bauvorhaben stets mit den Erfordernissen des Grundwasserschutzes in Einklang zu bringen. Während das Bundesbodenschutzgesetz [6] bzw. die dazugehörige Verordnung [7] den nachsorgenden Grundwasserschutz regelt, wurden von der Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) Grundsätze zum vorsorgenden Grundwasserschutz bei Abfallverwertungsmaßnahmen [8] verabschiedet. Hinzu kommen weitere bundesländer-spezifische Regelungen und Anforderungen für den Einsatz von Sekundärbaustoffen.

Um die bestehenden Verordnungen zu harmonisieren und nach Möglichkeit zu deregulieren, wird auf Bundes- und Länderebene eine Novellierung angestrebt; dies auch vor dem Hintergrund der weiter fortschreitenden Umsetzung europäischer Gesetze und Normen in deutsches Recht.

3 Durchgeführte Arbeiten

Am Josef-Vogl-Technikum des Bayerischen Landesamts für Umweltschutz wurden in den Jahren 1995 – 2002 zwei Forschungsvorhaben abgewickelt, die sich schwerpunktmäßig mit der Schadstoffbelastung und baustofflichen Verwertung von MV-Schlacke befassten.

Heinz Riedel
Tel.: 0821/7000-283,
heinz.riedel@lfu.bayern.de

3.1 Schadstoffbelastung von MV-Schlacke

Im Forschungsprojekt „Organische und anorganische Schadstoffbelastung von Reststoffen/Rückständen aus der thermischen Behandlung von Restmüll“ [9], [10], das gemeinsam mit der BlfA GmbH, Augsburg, durchgeführt wurde, standen u.a. der chemisch-mineralogische Aufbau, der Gehalt an anorganischen und organischen Schadstoffen und das Auslagerverhalten von MV-Schlacke im Vordergrund.

An sechs bayerischen Müllverbrennungsanlagen (MVA) wurden ein- bis zweiwöchige Untersuchungskampagnen durchgeführt und sämtliche Prozessabfälle sowie Roh-/Reingas beprobt; an drei Anlagen wurden auch geänderte Betriebsweisen (Eindüsung von überhitztem Wasserdampf in den Feuerraum, Einsatz Sauerstoff angereicherter Primärluft, Absenkung der Feuerraumtemperatur) untersucht.

An fünf der sechs MVA wurden bis zu 50 Mg Schlacke der jeweiligen Untersuchungswoche unter den dort üblichen Bedingungen (Schlackeaufbereitung, Lagerungsart) bis zu zwei Jahre gelagert und regelmäßig beprobt; ebenso wurden im Technikum Untersuchungen im Mg-Maßstab zur Schlackealterung durchgeführt.

Um aus der Untersuchung repräsentativer Proben aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten, wurden die feuchten Rohschlacken mit relativ großem Aufwand beprobt. So wurden an den MVA tagsüber im stündlichen Abstand acht Einzelproben von mindestens 70 kg MV-Schlacke genommen, vereinigt, entschrottet und durchmischt.

Von dieser Mischprobe wurden zwei Aliquots (Tagesmischprobe (TMP), Rückstellprobe) à 100 kg abgetrennt.

Die fünf Rückstellproben einer Woche wurden vereinigt, durchmischt und daraus ca. 100 kg als Wochenmischprobe (WMP) gewonnen.

Somit resultierten aus jeder Untersuchungswoche fünf TMP und eine WMP, die vor den physikalisch-chemischen und mineralogischen Laboruntersuchungen in die in der Verwertungspraxis gängigen Korngrößenfraktionen Fein- (< 8 mm) und Grobfraktion (8 – 32 mm) mittels Siebung aufgetrennt wurden.

Bei der chemischen Analytik wurden die Gehalte an anorganischen (Schwermetalle) und organischen Schadstoffen {polychlorierte Dibenzodioxine/furane (PCDD/PCDF), polychlorierte Biphenyle (PCB), polychlorierte Benzole (PCBz), polychlorierte Phenole (PCPh) und polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK)} ermittelt.

3.2 Baustoffliche Verwertung von MV-Schlacke

Ziel des Forschungsprojekts „Verwertung von Rostschlacken aus der thermischen Abfallbehandlung im Rahmen von Bauvorhaben“ [11] war es, detaillierte Aussagen über die Eignung von MV-Schlacke für den Einsatz bei Bauvorhaben zu erhalten. Dabei standen Bauprojekte, bei denen Schlacke nicht als Zuschlagsstoff oder dünne (z.B. Frostschutz-) Schicht, sondern als vergleichsweise mächtiger, evtl. rückbaubarer Mono-Körper eingebaut wird (vgl. z.B. [12]), im Vordergrund.

Die Schlackekörper der fünf beprobten Bauvorhaben (Industriebauten: Bauwerksgründungen, Tragschichten unter Asphalt bzw. verfügten Pflastersteinen) waren aus der Schlacke einer bayerischen MVA (Anlage II des in 3.1 genannten Forschungsprojekts) aufgebaut, was eine bessere Vergleichbarkeit der Ergebnisse zulässt. Zusätzlich wurden auf der Technikumsfreifläche unter (bau-)praxisüblichen Bedingungen Schlacketestfelder errichtet, an denen u.a. der Wasser-, Wärme- und Stofftransport/-haushalt untersucht wurde.

Neben den bodenmechanischen und bautechnischen Kennwerten wurden das Verhalten anorganischer Schadstoffe und die Emissionen in den Sickerwasserpfad ermittelt.

4 Ergebnisse

4.1 Feststoffgehalte in der entschrotteten Rohschlacke

Die Heterogenität des Siedlungsabfalls schlägt sich trotz Durchmischung im Müllbunker und auf dem Rost in einer räumlich und zeitlich stark inhomogenen chemisch-mineralogischen Zusammensetzung der MV-Schlacke nieder. Die anorganischen und organischen Schadstoffgehalte der Rohschlacken zeigen große Schwankungsbreiten. Insgesamt wurden geringe Schadstoffgehalte in den untersuchten Proben festgestellt; die Anhalts- bzw. Zuordnungswerte für die Schlackeverwertung [2] wurden meist eingehalten.

Die Feinfraktion weist i.d.R. höhere Schadstoffgehalte auf als die Grobfraktion; im Mittel ist sie ungefähr doppelt so stark belastet. Eine Verwertung der Feinfraktion ist generell als problematischer anzusehen als die der Grobfraktion.

Exemplarisch sind für die Fein- und Grobfraktion die Bleikonzentrationen dem LAGA-Anhaltswert (Abb. 1), die TOC-Werte dem

entsprechenden Zuordnungswert für MV-Schlacke (Abb. 2) gegenübergestellt. In beiden Abbildungen sind deutlich die zeitlichen Schwankungen der (Schadstoff-)Gehalte zu erkennen: an jeder MVA weisen die Werte der fünf TMP eine große Streubreite auf (bis zu Faktor 6 zwischen minimalem und maximalem Tagesmittelwert). Erst über einen längeren Betrachtungszeitraum gleichen sich die zeitlichen Schwankungen in der Zusammensetzung des Siedlungsabfalls aus: die (Schadstoff-)Gehalte der WMP der sechs untersuchten Anlagen nähern sich einem gemeinsamen Mittelwert („durchschnittliche Schlackebelastung“).

Tabelle 1 fasst die ermittelten Gehalte der untersuchten organischen Schadstoffe zusammen; angegeben sind die Mittel- sowie Minimal- und Maximalwerte aller untersuchten Proben, differenziert in Fein- und Grobfraktion. Bei den organischen Schadstoffen unterscheiden sich Minimal- und Maximalwerte mindestens um eine, vereinzelt (PCB in Grobfraktion, PCPh in Feinfraktion) um über zwei Größenordnungen.

4.2 Gehalte im Eluat der entschrotteten Rohschlacke

Entscheidend für die umweltgerechte Verwertbarkeit von MV-Schlacken sind letztlich nicht die Inhaltsstoffe, sondern das Auslaugverhalten. Aus der Mobilität der in der Feststoffmatrix enthaltenen Schadstoffe lässt sich das Umweltgefährdungspotenzial durch Elutionstests abschätzen. Das in der deutschen Gesetzgebung und diversen Regelwerken etablierte Verfahren ist die Elution nach DIN 38 414 Teil 4 (DEV S4), ein vergleichsweise einfach durchzuführendes „statisches“ Schüttelverfahren. Einen differenzierteren Einblick in die Mobilisierung von Schadstoffen geben aufwändigere Elutionsverfahren, die unterschiedliche Aussagen über den untersuchten Feststoff zulassen, z.B. über dessen kurz-, mittel- und langfristiges Elutionsverhalten: pH-stat-Verfahren (Anwendung z.B. in [13], [14], [15], [16], [17]), Elution mit organischen Säuren (in [18], ungesättigte Perkolationen (in [14], [17]), Kolonntest (in [19]), sequenzielle Extraktionen (in [15], [16],[17]). In o.g. Forschungsvorhaben wurde zum direkten Vergleich mit [2] die Elution nach DEV S4 angewandt.

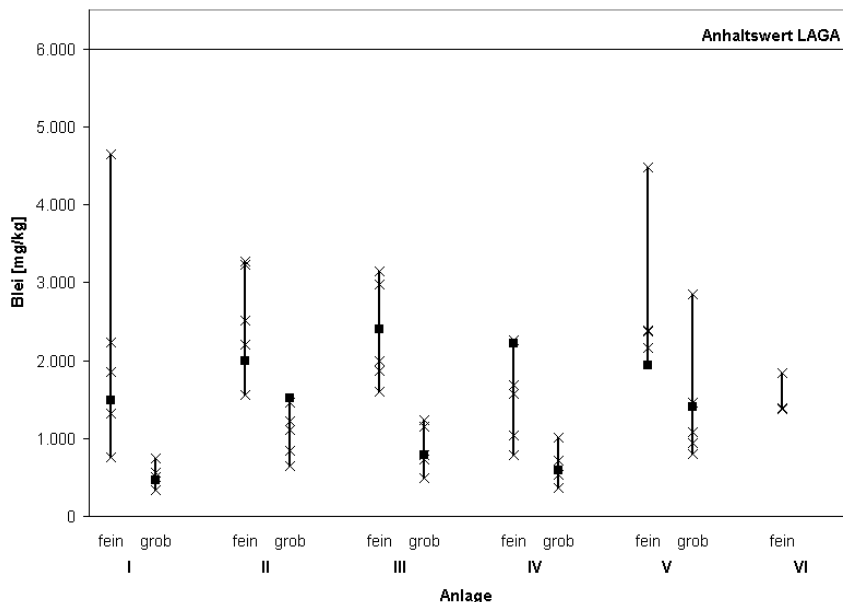


Abb. 1: Bleikonzentration der Rohschlackefein- und -grobfraktion der Anlagen I bis VI

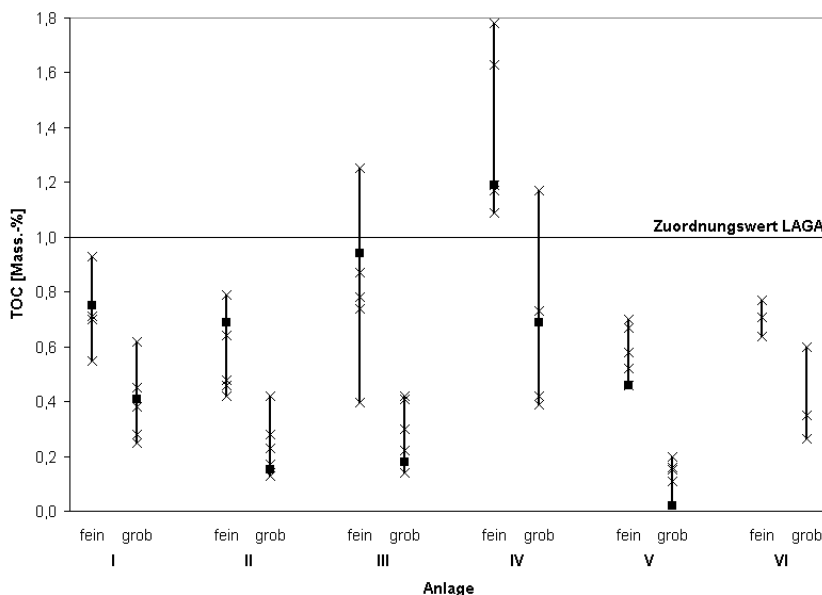


Abb. 2: Organischer Gesamtkohlenstoffgehalt (TOC) der Rohschlackefein- und grobfraktion der Anlagen I bis VI

Tab. 1: Gehalte organischer Schadstoffe in Fein- und Grobfraktion von MV-Rohschlacke (Mittelwerte und Wertebereiche) im Vergleich zum Anhaltswert [2]

	Einheit	Feinfraktion (< 8 mm)		Grobfraktion (8 – 32 mm)		Anhaltswert
		MW	Wertebereich	MW	Wertebereich	
PCDD/PCDF	ng I-TEQ/kg	14,8	3,6 – 30,9	5,3	0,7 – 11,7	0,6 – 30
PCB	µg/kg	21,7	1,4 – 52,8	34,1	0,4 – 102	-
PCBz	µg/kg	7,1	1,7 – 16,7	2,7	0,5 – 5,3	-
PCPh	µg/kg	28,1	0,4 – 87,0	8,7	0,6 – 40,2	-
PAK (EPA)	µg/kg	746	83,4 – 2.150	329	29,2 – 1.900	-

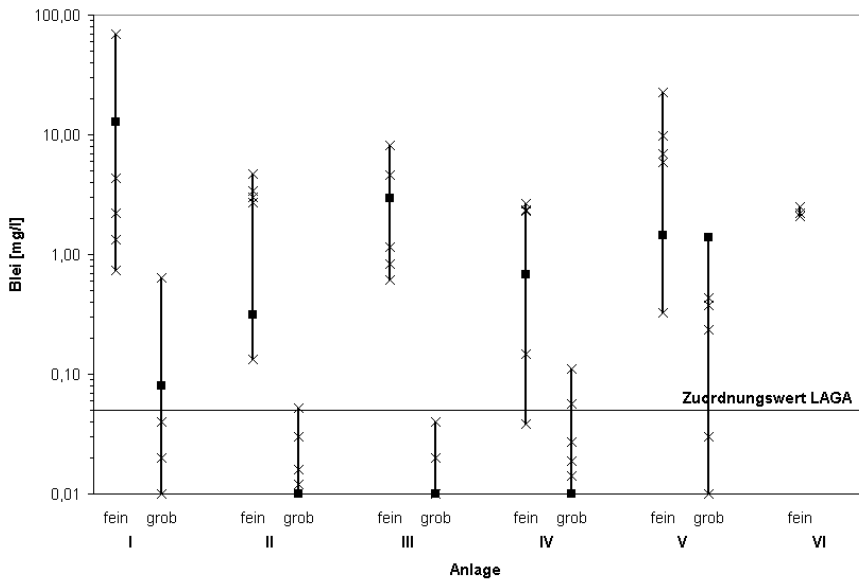


Abb. 3: Bleikonzentration der Eluate der Rohschlackefeinfraction der Anlagen I bis VI

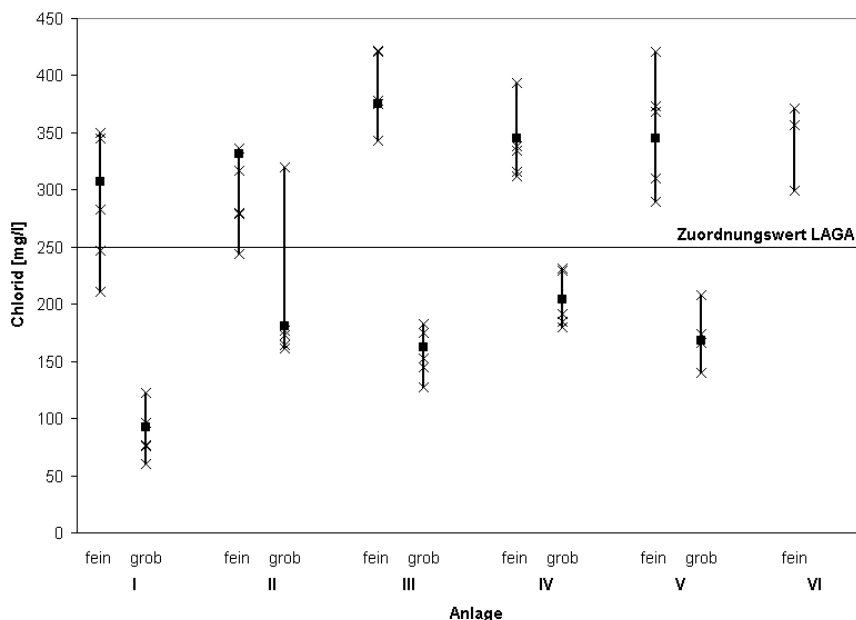


Abb. 4: Chloridkonzentration der Eluate der Rohschlackefeinfraction der Anlagen I bis VI

Die (Schadstoff-)Gehalte in den Eluaten der Rohschlacken streuen stark, obwohl für die Elution nach DEV S4 gemäß [2] vergleichsweise große Massen (Feinfraktion: mindestens 150 g, Grobfraktion: 1.000 g) der homogenisierten Proben eingesetzt wurden. Bedingt durch die Streubreite der Eluatwerte ist die Einhaltung der Zuordnungswerte [2] generell nicht gewährleistet. Wie bei den Rohschlacken gilt für die Eluate, dass die der Feinfraktion höher belastet sind als die der Grobfraktion; eine direkte Korrelation der Eluatkonzentrationen zum Feststoffgehalt oder zur spezifischen Oberfläche der MV-Schlacke ist nicht erkennbar.

Problematische Parameter bei den Eluaten der Rohschlacke, insbesondere für die Feinfraktion, sind Blei (Abb. 3) und Chlorid (Abb. 4). Beim Blei überschreiten nahezu alle Werte der Feinfraktioneluate den entsprechenden Zuordnungswert [2], die der Grobfraktioneluate liegen teilweise darüber; die Werte der TMP der einzelnen Anlagen schwanken um bis zu zwei Größenordnungen. Beim Chlorid sind fast alle Eluatwerte der Feinfraktion über dem Zuordnungswert, die Eluate der Grobfraktion halten hingegen den Zuordnungswert i.d.R. ein; die Streuung der Einzelwerte ist nicht so stark ausgeprägt wie beim Blei (maximal Faktor 2).

4.3 Einfluss der Alterungsprozesse auf die Gehalte im Schlackeeluat

MV-Schlacke besteht neben variablen Anteilen an Durchläufermaterialien (z.B. Glas, Steine) überwiegend aus Hochtemperaturfestphasen, die unter natürlichen Umweltbedingungen metastabil sind; daher ist Rohschlacke ein äußerst reaktives Material.

Bereits beim Abkühlen/Abschrecken der MV-Schlacke im Nassentschlacker verändern Umwandlungsprozesse den Mineralbestand. Die Mineralreaktionen sind nach der für die Verwertung von MV-Schlacke vorgeschriebenen Alterungsdauer von drei Monaten [2] bereits weit fortgeschritten und über einen Zeitraum von mindestens zwei Jahren nachweisbar.

Es handelt sich vorwiegend um Carbonatisierungs- (insbesondere Umsetzung von CaO und Ca(OH)_2 mit CO_2 zu CaCO_3) und Hydratisierungsreaktionen, die hauptsächlich am Feinstkorn ablaufen und durch die Bildung neuer Mineralphasen die spezifische Oberfläche, den Carbonatgehalt (TIC) und den Glühverlust erhöhen. Gerade der Glühverlust als vergleichsweise einfach zu bestimmende Größe – für die Rohschlacke Leitparameter für den Ausbrandgrad – kann für die gealterte Schlacke als Leitparameter für den Alterungszustand verwendet werden.

Bei der Alterung bleiben die Schadstoffgehalte weitestgehend in der MV-Schlacke. Jedoch vermindern der mit der Mineralneubildung einhergehende Einbau von Schadstoffen in das Kristallgitter, deren Adsorption an neugebildete Mineralphasen und die durch die Carbonatisierung bedingte pH-Absenkung der Schlacke, die mit der Schwermetalllöslichkeit korreliert, die Schadstofffreisetzung aus der MV-Schlacke. Die Alterung verbessert somit entscheidend die Schlackequalität. Durch geeignete technische Maßnahmen (z.B. Entwässern in Schlackebunkern[2], Schlackewäsche ohne/mit Kohlenstoffdioxidbegasung [2], [20], [21]) können die Alterungsvorgänge intensiviert werden.

Die Eluate gealterter MV-Schlacken halten hinsichtlich der Schwermetallkonzentrationen die Zuordnungswerte für eine Verwertung [2] weitgehend ein.

Abbildung 5 zeigt am Beispiel zweier Alterungsversuche mit Schlackefeinfraction der Anlage II bei natürlicher Beregnung (Freifläche) bzw. ohne Wasserzutritt (Technikum) deutlich, wie Alterungsreaktionen das Auslaugverhalten von MV-Schlacke positiv beeinflussen: bereits nach zwei Monaten liegen die Eluatkonzentrationen für Blei unter dem Zuordnungswert.

Anders das Verhalten von Chlorid: die Konzentration in den Schlackeeluaten zeigt keine Abhängigkeit vom Alterungsgrad der MV-Schlacke.

Während die Eluate der Grobfraction gealterter Schlacke dem Zuordnungswert i.d.R. genügen, gilt dies für Chlorid bei der Feinfraction auch gealterter Schlacke nicht. Die Chloridkonzentrationen der Eluate (Feinfraction) zeigen für die verschiedenen MVA über den Zeitraum von einem Jahr ein unterschiedliches Verhalten (Abb. 6); dabei liegt die Mehrzahl der Chloridwerte oberhalb des Zuordnungswerts.

4.4 Untersuchungen an Bauvorhaben

Die Schlackekörper der untersuchten Bauvorhaben bestanden entweder aus einem definierten Gemisch gealterter Schlacke Fein-/Grobfraction oder aus der Feinfraction und wiesen Stand- bzw. Lagerungszeiten zwischen wenigen Wochen und mehreren Jahren auf.

Bei Mächtigkeiten bis zu ca. 1,5 m betragen die eingebauten Schlackemassen bis zu 13.000 Mg, was der Schlackeproduktion der MVA von ca. drei Monaten entspricht.

Die Schlackekörper wurden nach Freilegung der Schlackegründung (z.B. durch Abtragen der Betonstein-/Splitt-Überdeckung), mittels Kernbohrung durch den Hallenboden (Betonplatte) bzw. unmittelbar während des Einbaus lokal beprobt.

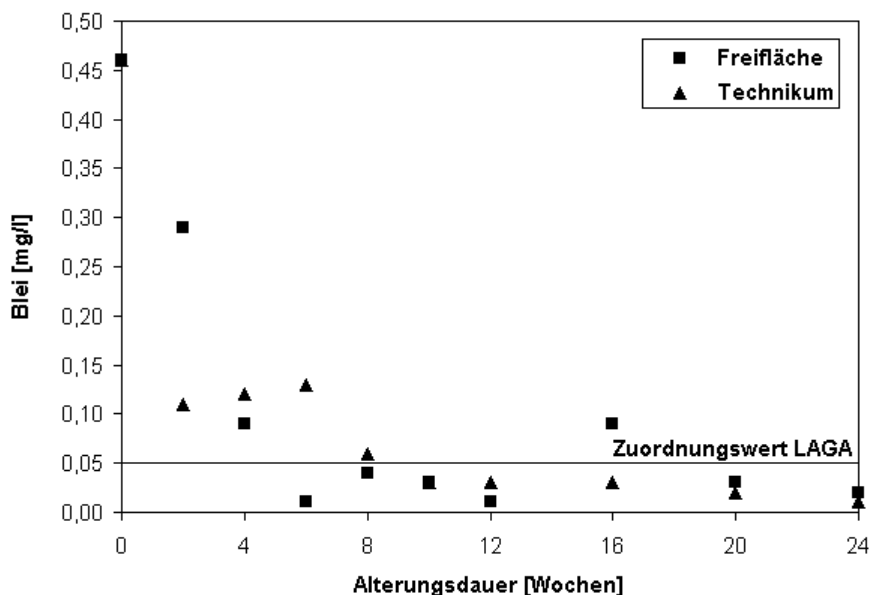


Abb. 5: Bleikonzentration der Eluate der Schlackefeinfraction (Anlage II) im Verlauf der Alterung bei natürlicher Beregnung (Freifläche) bzw. ohne Wasserzutritt (Technikum)

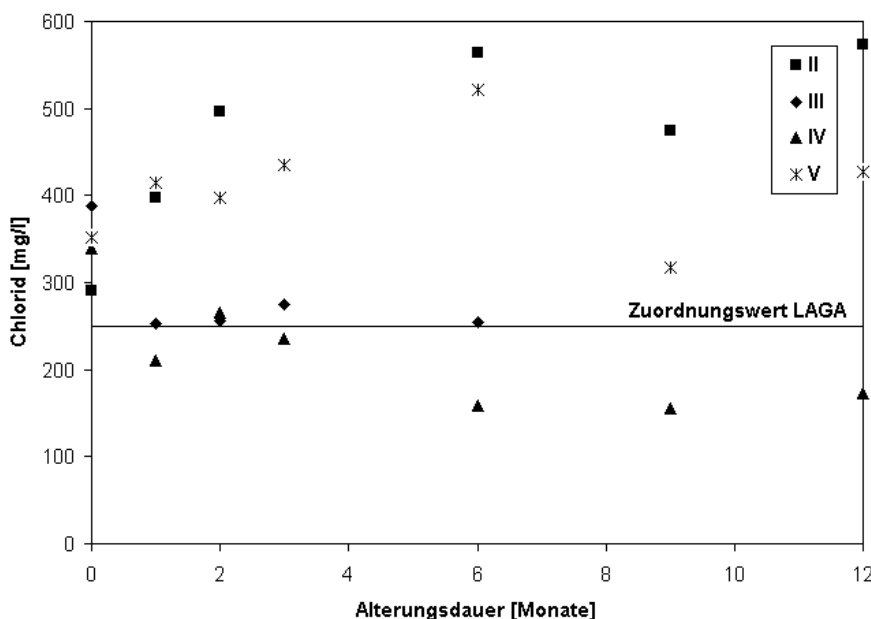


Abb. 6: Chloridkonzentration der Eluate der Schlackefeinfraction der Anlagen II bis V im Verlauf der Alterung

Die Untersuchungen der Proben zeigen für einige chemische (z.B. TOC, Schwermetallgehalte) und mechanische Kenngrößen der MV-Schlacke keinen signifikanten Zusammenhang zur Standzeit der Schlackekörper. Bei den Schlackeeluat nehmen die elektrische Leitfähigkeit, Schwermetall- und Anionenkonzentrationen mit dem Alter der Schlacke bzw. -gründung ab; d.h. das Auslaugverhalten wird durch die Lagerungs- bzw. Standzeit von MV-Schlacke, in Übereinstimmung mit den Ergebnissen zum Einfluss der Alterungsprozesse, deutlich positiv beeinflusst. Trotz der Streuung der Eluatwerte (bis zu Faktor 60 (Blei)) wurden die Zuordnungswerte [2] nur bei zwei Parametern (Blei, Chlorid) überschritten (Tab. 2).

Tab. 2: Eluatwerte der Schlackeproben aus den untersuchten Bauvorhaben (Wertebereiche) im Vergleich zu den Zuordnungswerten [2]

	Einheit	Eluatwert	Zuordnungswert
elektrische Leitfähigkeit	µS/cm	709 – 2.320	6.000
Blei	µg/l	1,2 – 70,4	50
Cadmium	µg/l	< 0,2 – 4,0	5
Kupfer	µg/l	7,5 – 33,3	300
Nickel	µg/l	1,0 – 15,2	40
Quecksilber	µg/l	< 0,05	1
Zink	µg/l	9,5 – 57,8	300
Chlorid	mg/l	43,2 – 272	250
Sulfat	mg/l	12,3 – 59,0	600

4.5 Untersuchungen an Testfeldern

Für die Untersuchungen hinsichtlich Wasser-, Wärme- und Stoffhaushalt von verdichtet eingebauten Schlackekörpern wurden mit der Schlackefeinfraction Testfelder (Höhe: 1,5 m; Volumen: 5,4 – 6,8 m³; Trockenmasse: 7,3 – 9,4 Mg) angelegt, die mit Temperatur- und Feuchtesensoren instrumentiert waren und sich in der Art der Bewässerung (natürlich - künstlich) unterscheiden. Der Einsatz von Schlackefeinfraction stellt hinsichtlich des Gefährdungspotenzials den „worst case“ bei der Verwertung in Bauvorhaben dar. Die Sickerwässer wurden in einer abgedeckten PE-Wanne aufgefangen.

Tab. 3: Massenbilanz für Schwermetalle und Hauptanionen für den Freiflächenversuch mit natürlichem Niederschlag (eluierte Massen absolut und bezogen auf initiale Masse)

	initiale Masse		eluierte Masse (DEV S4)		eluierte Masse (Sickerwasser)	
	g	g	‰	g	‰	g
Arsen	241	0,20	0,83	0,050	0,21	
Blei	9.506	2,55	0,27	0,004	0,00042	
Cadmium	87	0,02	0,23	0,005	0,057	
Chrom	4.668	2,76	0,59	0,251	0,054	
Kupfer	19.360	3,33	0,17	0,526	0,027	
Nickel	1.147	0,32	0,28	0,008	0,0070	
Zink	35.690	3,89	0,11	0,177	0,0050	
Chlorid	68.130	28.950	425	8.680	127	
Sulfat	87.290	2.900	33	549	6,3	

Die Schwermetallfrachten im Sickerwasser der Testfelder liegen bezogen auf die Feststoffgehalte im Schlackekörper im Promille-Bereich, was die weitgehende Inertisierung der gealterten, eingebauten MV-Schlacke belegt. Vergleicht man die Sickerwasserfrachten mit den Eluatwerten der Schlacke, so erreichen die Frachten im Untersuchungszeitraum bis zu ca. 30 % der durch Elution mobilisierbaren Schwermetall- und Anionengehalte; d.h. mit Eluatwerten nach DEV S4 lassen sich die mittelfristigen Sickerwasserfrachten aus Schlackekörpern konservativ abschätzen. Anders sieht es bei Konzentrationsbetrachtungen aus. Die Emissionsspitzen aus den Testfeldern liegen z.T. deutlich über den entsprechenden Eluatwerten; d.h. bezüglich der maximal auftretenden Sickerwasserkonzentrationen aus Schlackekörpern lässt das Schlackeeluat keine belastbare Vorhersage zu.

Tabelle 3 stellt für einen offenen Freiflächenversuch mit natürlichem Niederschlag und Verdunstung (Bilanzzeitraum: 200 Tage) das insgesamt in dem Testfeld vorhandene Schwermetall- und Anioneninventar (initiale Masse) den mittels Elution mobilisierbaren (eluierte Masse (DEV S4)) bzw. den aus dem Schlackekörper freigesetzten Gehalten (eluierte Masse (Sickerwasser)) gegenüber. Die emittierten Schadstofffrachten liegen bezogen auf die Gehalte im Schlackekörper im Bereich $\leq 0,21$ ‰ (Arsen), bezogen auf die Eluatgehalte zwischen 0,2 % (Blei) und 25 % (Arsen, Cadmium). Bei dem Vergleich der potenziell nach DEV S4 mobilisierbaren (Eluat) mit den tatsächlich emittierten Schwermetallanteilen (Sickerwasser) ist das unterschiedliche Verhältnis Feststoff : Eluent der beiden Systeme im Bilanzzeitraum zu beachten (Schlackeprobe : Eluat = 1 : 10, Schlackekörper : Sickerwasser \approx 8 : 1; d.h. das Verhältnis Feststoff : Eluent ist beim DEV S4-Test um den Faktor 80 niedriger als im Freiflächenversuch).

Aus dem Verhältnis eluierter : initialer Masse ergeben sich für die Schwermetalle in den Systemen Schlackeprobe/Eluat bzw. Schlackekörper/Sickerwasser ähnliche Reihenfolgen hinsichtlich der Mobilisierung, d.h. bezüglich der Frachten bildet das modellhafte, stark vereinfachte System DEV S4-Elution das reale System Schlackekörper in erster Näherung ab:

- Eluate: As > Cr > Ni, Pb > Cd > Cu > Zn
- Sickerwässer: As > Cd, Cr > Cu > Ni, Zn > Pb

Hinsichtlich der Mobilisierungsbedingungen stellen DEV S4-Test und Freiflächenversuch mit natürlichem Niederschlag grundsätzlich zwei völlig unterschiedliche Systeme dar. Die DEV S4-Elution ist ein geschlossenes System, bei dem der Eluent nur einmal (Beginn der Elution) zugegeben wird; der Schlackekörper mit natürlichem Nieder-

schlag stellt dagegen ein offenes System dar, bei dem stochastisch verteilt frischer Eluent zugeführt wird. Im DEV S4-Test ist der Eluent deionisiertes Wasser, das mobilisierbare Feststoffanteile desorbiert, löst und dadurch seine Zusammensetzung ändert; durch den Schüttelvorgang ist eine ständige Homogenisierung des Eluenten gewährleistet. Im Freiflächenversuch ist der Eluent Niederschlagswasser; die oberste Schicht des Schlackekörpers wird bei jedem Regenereignis eluiert, während die darunter liegenden Schichten mit dem Eluat der darüber liegenden Schichten eluiert werden und entlang des Fließwegs unterschiedliche Konzentrationsgefälle zwischen Fest- und Flüssigphase (als treibende Kraft für den Phasenübergang fest → flüssig) wirksam sind. Im Gegensatz zur lediglich zeitabhängigen Entwicklung der Konzentrationsgradienten im DEV S4-Test ist das treibende Gefälle im Freiflächenversuch eine Funktion von Ortskoordinate, Zeit und Niederschlagsganglinie. Aufgrund der zeitlichen Begrenztheit spielen beim DEV S4-Test zeitliche Prozesse im Feststoff (Alterungsreaktionen) im Gegensatz zum Freiflächenversuch keine Rolle.

Für die Schwermetalle Arsen, Chrom, Cadmium, Kupfer und Zink sind die unterschiedlichen Mobilisierungsbedingungen (insbesondere pH-Wert, Redoxpotenzial, Ionenstärke, Komplexbildner, Kontaktzeit Feststoff/Eluent) im DEV S4-Test bzw. im Schlackekörper von untergeordneter Bedeutung: die Reihenfolge der Mobilisierbarkeit bleibt in beiden Systemen annähernd gleich. Anders hingegen bei den Schwermetallen Nickel und Blei: bedingt durch fortschreitende Alterungsprozesse im Schlackekörper (besonders Carbonatisierungsreaktionen) und die hieraus resultierende pH-Absenkung des Eluenten werden beide Schwermetalle im System Schlackekörper/Sickerwasser wesentlich geringer mobilisiert als im System Schlackeprobe/Eluat.

Die Entwicklung von pH-Wert, Blei- und Chloridkonzentration im Sickerwasser des offenen Freiflächenversuchs für den Bilanzzeitraum von 200 Tagen zeigt Abbildung 7. Der pH-Wert ist über den gesamten Versuchszeitraum basisch und nimmt von knapp 11 bei Versuchsbeginn auf ca. 9 ab. Die pH-Pufferung wird durch die Lösung von CaO und Ca(OH)₂ kontrolliert. Der Schlackekörper nimmt durch den Gasaustausch mit der Atmosphäre und über das Niederschlagswasser Kohlenstoffdioxid auf, so dass im Zuge der Carbonatisierung langfristig abnehmende pH-Werte im Sickerwasser resultieren. Auffällig ist der im Zusammenhang mit einem Starkregenereignis bei ca. 140 Tagen beobachtete pH-Anstieg auf

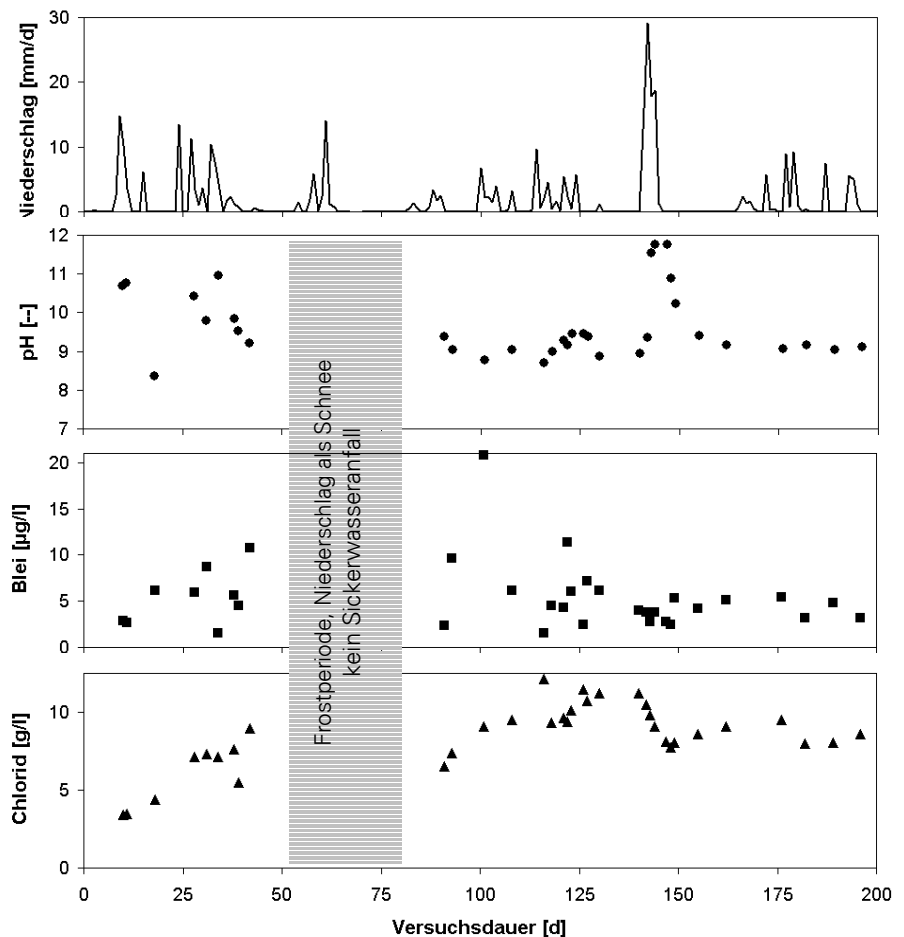


Abb. 7: Zeitlicher Verlauf von Niederschlagshöhe, pH-Wert, Blei- und Chloridkonzentration im Sickerwasser des Freiflächenversuchs mit natürlichem Niederschlag

Werte um 11,8; während des Sickerwasserdurchtritts wird bei Starkregenereignissen Ca(OH)₂ aus Porenräumen freigesetzt, was bei geringeren Niederschlagsintensitäten nicht der Fall ist.

Die Bleikonzentrationen im Sickerwasser liegen mit Werten i.d.R. unter 10 µg/l im unteren Bereich der Eluatkonzentrationen gealterter Schlackefeinfraktionen (vgl. Abb. 5 und Tab. 2). Die höchste Sickerwasserkonzentration wird mit 20,8 µg/l kurz nach der Frostperiode (Flussunterbrechung) erreicht. Dagegen liegen die Chloridkonzentrationen im Sickerwasser des offenen Freiflächenversuchs deutlich höher als die entsprechenden Eluatwerte. Wurden in den Schlackeeeluaten Chloridgehalte unter 0,6 g/l (Alterungsuntersuchungen; vgl. Abb. 6, Anlage II) bzw. 0,3 g/l (Bauvorhaben; vgl. Tab. 2) ermittelt, lagen die im Sickerwasser gemessenen Chloridwerte über 3 g/l, der höchste Wert sogar über 12 g/l. Ursache für diese hohen Chloridkonzentrationen dürfte das gegenüber dem DEV S4-Eluat wesentlich höhere Feststoff/Lösungs-Verhältnis sein.

5 Schlussfolgerungen

Die Untersuchungen belegen, dass Müllverbrennungsschlacke durchaus umweltgerecht z.B. in Bauvorhaben verwertet werden kann, wenn folgende Punkte beachtet werden:

• Aufbereitung

Hinsichtlich einer Optimierung der Qualität des Reststoffs Schlacke (insbesondere bezüglich einer Minimierung der Auslaugbarkeit) erscheint eine über den Zeitraum von drei Monaten hinausgehende Zwischenlagerung sinnvoll.

• Qualitätssicherung

Die räumlich und zeitlich sehr heterogene Zusammensetzung der MV-Schlacke bedingt große Schwankungsbreiten der anorganischen und organischen Schadstoffgehalte selbst in den aufbereiteten Schlacken. Durch eine regelmäßige, langfristige Eigenkontrolle und Fremdüberwachung ist eine gleichbleibende Qualität für eine umweltgerechte Verwertung von MV-Schlacke sicherzustellen.

• Verwertung in Bauvorhaben

Um Schadstoffemissionen aus Schlackekörpern in das Grundwasser zu verhindern, müssen bautechnische Maßnahmen einen ungehinderten Zutritt von Niederschlagswasser unterbinden. Ein ordnungsgemäßer Umgang mit dem Sekundärbaustoff Schlacke ist durch die ausführenden Firmen zu gewährleisten. Insbesondere müssen während Transport, Umschlag und Bauphase Staubemissionen durch eine ausreichende Befeuchtung vermieden werden, um gesundheitliche Beeinträchtigungen des Arbeitspersonals sowie Belastungen der Umwelt zu minimieren. Gleichzeitig ist die Einstellung optimaler Wassergehalte zur Erreichung maximaler Einbaudichten unerlässlich.

Literatur

- [1] Bayerisches Landesamt für Umweltschutz (Hrsg.): Abfallwirtschaft - Hausmüll in Bayern - Bilanzen 2002. Bayerisches Landesamt für Umweltschutz, Augsburg 2003
- [2] Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA): Merkblatt über die Entsorgung von Abfällen aus Verbrennungsanlagen für Siedlungsabfälle (LAGA M19). Erich Schmidt Verlag, Berlin 1994
- [3] Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA): Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Reststoffen/Abfällen – Technische Regeln – (LAGA M20). Erich Schmidt Verlag, Berlin 1994
- [4] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV): Technische Lieferbedingungen für Mineralstoffe im Straßenbau (TL Min-StB 2000). FGSV Verlag, Köln 2000
- [5] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV): Richtlinien für die umweltverträgliche Anwendung von industriellen Nebenprodukten und Recycling-Baustoffen im Straßenbau (RuA-StB 01). FGSV Verlag, Köln 2001
- [6] Anonym: Gesetz zum Schutz vor schädlichen Bodenveränderungen und zur Sanierung von Altlasten (Bundesbodenschutzgesetz – BBodSchG). Vom 17. März 1998. BGBl. I (1998), S. 502; geändert (2001), S. 2331
- [7] Anonym: Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV). Vom 12. Juli 1999. BGBl. I (1999), S. 1554
- [8] Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA): Grundsätze des vorsorgenden Grundwasserschutzes bei Abfallverwertung und Produkteinsatz (GAP-Papier). www.lawa.de/
- [9] Knorr, W.; Hentschel, B.; Marb, C.; Schädel, S.; Swerev, M.; Vierle, O.; Lay, J. P.: Rückstände aus der Müllverbrennung – Chancen für eine stoffliche Verwertung von Aschen und Schlacken {Deutsche Bundesstiftung Umwelt (Hrsg.): Initiativen zum Umweltschutz, Bd. 13}. Erich Schmidt Verlag, Berlin 1999 ISBN 3-503-04858-8
- [10] Hentschel, B.: Vergleichende mineralogische und chemische Untersuchungen an Rostschlacken aus Anlagen zur thermischen Abfallbehandlung – Alterungsverhalten und Einfluss der Anlagenbetriebsweise. Shaker Verlag, Aachen 1999 ISBN 3-8265-4740-3
- [11] Bayerisches Landesamt für Umweltschutz (Hrsg.): Verwertung von Rostschlacken aus der thermischen Abfallbehandlung im Rahmen von Bauvorhaben: Geotechnische und umweltrelevante Eigenschaften des Schlackekörpers unter den in der

- Verwertungspraxis üblichen Einbaubedingungen.
Bayerisches Landesamt für Umweltschutz, Josef-Vogl-Technikum, Augsburg 2002
www.bayern.de/lfu/bestell/index.html
- [12] Anonym:
Sekundär-Baustoffe bevorzugt.
Baustoff, Recycling u. Deponietechnik (2000) 3, S. 19 – 21
- [13] Meima, J. A.; Comans, R. N. J.:
Geochemical modeling of weathering reactions in municipal solid waste incinerator bottom ash.
Environ. Sci. Technol. 31 (1997) 5, S. 1269 – 1276
- [14] Goetz, D.:
Verwertung von Müllverbrennungsschlacke.
Entsorgungspraxis (1997) 10, S. 33 – 34
- [15] Lindert, M.; Görtz, W.:
Vergleich der Verwertbarkeit von Aschen und Schlacken.
Müll und Abfall (1997) 11, S. 701 – 705
- [16] Huber, H.; Jaroš, M.; Lechner, P.:
Langfristiges Emissionsverhalten von MVA-Schlacke.
Wasser & Boden 50 (1998) 2, S. 14 – 18
- [17] Hirschmann, G.:
Langzeitverhalten von Schlacken aus der thermischen Behandlung von Siedlungsabfällen. Fortschr.-Ber. VDI Reihe 15 Nr. 220.
VDI Verlag, Düsseldorf 1999
- [18] Köster, R.; Vehlow, J.:
Verwertung von Schlacken aus der Abfallverbrennung.
Chemie in unserer Zeit 36 (2002) 2, S. 82 – 89
- [19] Pfrang-Stotz, G.; Reichelt, J.:
Charakterisierung und Bewertung von Müllverbrennungsschlacken aus 15 Müllverbrennungsanlagen unterschiedlicher Verfahrenstechnik.
Müll und Abfall (1999) 5, S. 262 – 268
- [20] Koralewska, R.; Faulstich, M.:
Process integrated carbonation of bottom ashes.
In: Dhir, R. K.; Dyer, T. D.; Paine, K. A. (Ed.): Sustainable construction: Use of incinerator ash. Proceedings of the International Symposium at the University of Dundee (UK) on 20 – 21 March 2000. S. 195 – 203.
Thomas Telford Publishing, London 2000
ISBN 0-7277-2861-X
- [21] Gohlke, O.; Busch, M.; Horn, J.:
Integrierte Verfahren zur Qualitätsverbesserung von Müllverbrennungsschlacken.
Umweltpraxis (2001) 11, S. 13 – 17