

Neues aus der Abfallwirtschaft

Müllverbrennungsschlacke

– Inhaltsstoffe, Menge und Verwertbarkeit

D. O. Reimann

Zweckverband Müllheizkraftwerk Stadt und Landkreis Bamberg, D – 8600 Bamberg

Einleitung

Das Abfallgesetz (AbfG) der Bundesrepublik Deutschland, rechtskräftig seit dem 1. 11. 1986, schreibt in § 1 Abs. 2 bei der Abfallentsorgung das **Gewinnen** von Stoffen oder Energien aus Abfällen (Abfallverwertung) und das **Ablagern** von Abfällen sowie die hierzu erforderlichen Maßnahmen des **Einsammelns**, **Beförderns**, **Behandelns** und **Lagerens** vor. (Von Bedeutung ist in diesem Zusammenhang auch der § 1a.)

Betreiber genehmigungsbedürftiger Anlagen – worunter auch die **thermischen Abfallverwertungsanlagen** (Müllverbrennungsanlagen) fallen – sind nach dem Bundesimmissionsschutzgesetz § 5 (BImSchG) verpflichtet, **reststoffarme Verfahren** einzusetzen oder **Reststoffe** durch **Verwertung** zu vermeiden.

Auch § 3 Abs. 2 AbfG zielt in diese Richtung, wonach die **Abfallverwertung** Vorrang vor der sonstigen Entsorgung hat, *wenn sie technisch möglich ist, die hierbei entstehenden Mehrkosten im Vergleich zu anderen Verfahren der Entsorgung nicht unzumutbar sind und für die gewonnenen Stoffe oder Energien ein Markt vorhanden ist oder insbesondere durch Beauftragung Dritter geschaffen werden kann.*

In der Kombination von § 1 mit § 3 AbfG und § 5 BImSchG wird für die thermische Abfallverwertung neben der Energienutzung vordringlich die Wahl **reststoffarmer Verfahren** bzw. die **Reststoffverwertung** gezielt gefordert.

Voraussetzung zur Erfüllung der gesetzlichen Forderungen sind die genaue Ermittlung und das Bilanzieren der verschiedenen Stoffströme bei der thermischen Abfallverwertung.

1 Schlackeanfall

In der Bundesrepublik Deutschland fallen jährlich 25 – 30 Mio Mg Hausmüll, hausmüllähnlicher Gewerbemüll

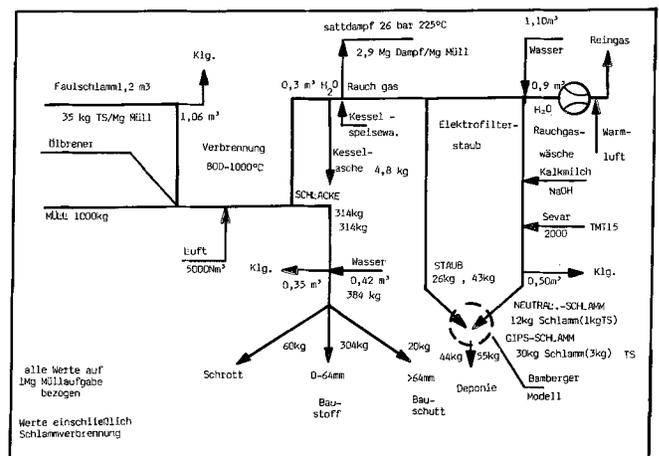


Abb. 1: Bamberger Müllverbrennungsschema mit spezifischen Frachtangaben pro Mg Müll [1]

und Sperrmüll an. Davon wurden lt. Angaben des Bundesumweltamtes 1986 = 7,2 Mio Mg verbrannt (1987 um 8 Mio Mg).

Abb. 1 stellt den Stoffkreislauf bei der thermischen Umsetzung von Hausmüll dar. Durch die oxidative Umwandlung der organischen Inhaltsstoffe des Hausmülls entsteht neben schadstoffbelasteten Rauchgasen und Abwärme die **Schlackefraktion** als maßgebende Rückstandsmenge. Sie setzt sich aus den mineralischen und nicht brennbaren Bestandteilen des Aufgabeproduktes Hausmüll (Unverbranntem $\leq 5\%$) sowie der Asche aus den verbrannten organischen Stoffen zusammen und macht mehr als 90 % der Reststoffe aus Verbrennungsanlagen aus. Bei Anstieg des Heizwertes der organischen Substanz eines Hausmülls verringert sich der Schlackeanteil. Der heute übliche Hausmüll mit einem Heizwert von 8 000 – 8 500 kJ/kg weist 30 – 35 % mineralische Substanz auf, sodaß eine Trockenschlackemenge von 300 – 350 kg/Mg Müll anfällt.

Die bei 800–1 000 °C in den Öfen entstandene, heiße Schlacke wird im Wasserbad abgeschreckt, nimmt dabei Wasser auf und besitzt nach dem Abzug aus dem Aschebunker in Abhängigkeit von dem Feinstanteil einen Wassergehalt von 15–25 %. Das Schlackegewicht feucht erhöht sich dadurch um 50–70 kg auf 350–400 kg/Mg Müll.

Diese mit Wasser gesättigte Feuchtschlacke enthält neben der Hauptfraktion an mineralischen Substanzen auch einen merklichen Schrottanteil an Fe- und NE-Reststoffen (40–60 kg/Mg Müll). Bei getrennter Sammlung von Fe vor der Müllsammlung kann wegen der damit verbundenen Erfassungsprobleme nur ein unbedeutender Anteil von Schrott der Schlacke entzogen werden [2]. Auch eine Fe-Vorsortierung vor der thermischen Abfallverwertung stellt nur eine Teillösung dar.

Unter dem Gesichtspunkt der stofflichen Verwertung und damit Vermeidung von Reststoffen aus Verbrennungsanlagen kommt der Wiederverwertung dieser mengenmäßig ausschlaggebenden Schlackefraktion eine besondere Bedeutung zu.

Voraussetzung zur Wiederverwertung und zur Beurteilung als z.B. **umweltvertreter Baustoff** ist die Kenntnis über die Schlackeinhaltsstoffe und die Einhaltung der Forderungen nach dem LAGA-Merkblatt „Verwertung von festen Verbrennungsrückständen aus Hausmüllverbrennungsanlagen“ [3]. Nur filterstaub- und sorptionsstofffreie Schlacke darf verwertet werden. Des Weiteren sind solche Verfahren zu wählen, die eine weitgehende Reduzierung möglicher Schadstoffe aus der Schlacke gewährleisten.

2 Einfluß der Verbrennungstemperatur und des Wascheffektes auf die Schlackequalität

Die Inhaltsstoffe der Schlacke werden durch die Müllverbrennungstemperatur beeinflusst. Je höher die Verbrennungstemperatur gefahren wird, um so mehr anorganische Schadstoffe wie Salze und auch leichtflüchtige Schwermetalle lassen sich aus dem Abfall in Richtung **Rauchgaspfad** abtrennen, und um so besser ist die Freisetzung und Trennschärfe dieser Stoffe. Das bedeutet, daß **hohe Verbrennungstemperaturen zu einer schadstoffärmeren Schlacke führen und deshalb verfahrensmäßig anzustreben sind**. Die Qualität der Schlacke läßt sich somit durch eine optimale Feuerung und Feuerungstemperatur positiv beeinflussen [4].

Da nach dem LAGA-Merkblatt [3] u.a. auch die **Ausbrandqualität**, gemessen als Glühverlust $\leq 5\%$ eingehalten werden muß, bedarf es auch hierfür einer weitgehenden Verbrennung der organischen Substanz, gekennzeichnet durch niedrigen Glühverlust und C-Gehalt.

Neben einer feuerungsmäßig beeinflussbaren Schadstofftrennung verdient die Behandlung der anfallenden Schlacke direkt nach der Verbrennung Beachtung, denn nach dem LAGA-Merkblatt [3] dürfen bei einmaliger Elution nach DEV-S4 nicht mehr als 2 Gew. % der Schlacke in Lösung gehen.

3 Schlackewaschung

Zur Schlackeabschreckung wird bereits anderweitig mehrfach benutztes Wasser verwendet.

Tabelle 1: Inhaltsstoffe des Abwassers aus Naßentascher nach 2-stündiger Sedimentation ohne zusätzliche Behandlungsverfahren sowie ausgewaschene Fracht aus Schlacke

Bezeichnung der untersuchten Stoffe	sedimentiertes Abwasser aus Naßentascher – Untersuchungszeitraum 1983–1988 –	
	Schwankungsbereich mg/l	Mittelwert mg/l bzw. mg/kg
pH	6,9 – 11,7	8,8
abfiltrierbare Stoffe	17 – 626	175
Abdampfrückstände	2 310 – 19 100	7 000
CSB (O ₂)	136 – 2 140	710
Sulfat (SO ₄)	203 – 1 990	590
Chlorid (Cl ⁻)	613 – 2 880	1 540
Fluorid (F ⁻)	0,4 – 8,9	1,7
Quecksilber (Hg)	0,0004 – 0,21	0,015
Cadmium (Cd)	<0,01 – 0,66	0,15
Kupfer (Cu)	0,1 – 1,0	0,26
Nickel (Ni)	<0,1 – 0,61	0,25
Chrom (Cr)	<0,1 – 0,15	0,10
Zink (Zn)	0,2 – 5,2	1,8
Blei (Pb)	0,20 – 3,2	0,80
Arsen (As)	0,003	–
POX	<0,01	–

Anmerkung: Werte gelten für eine spez. Abwassermenge aus Naßentascher von 0,35–0,40 m³/Mg Müll, T 55–60 °C, Aufenthaltszeit 15'

Die Schlacke einschließlich Kesselasche wird im Naßentascher durch den Transport auf einem Plattenbandförderer bei Wassertemperaturen von 55–60 °C und einer Aufenthaltszeit von 15 min gewaschen. Während dieses Waschvorganges beträgt die Wasseraufnahme der Schlacke ca. 20–30 %, die sich im anschließenden Schlackebunker durch natürliche Nachentwässerung auf ca. 15–25 % verringert.

Die Abwassermenge, die z.Zt. aus dem Naßentascher sowie der Nachentwässerung aus dem Schlackebunker anfällt, beträgt zwischen 350–400 l/Mg Müll, gleichbedeutend 1 l/kg Schlacke.

Die in → Tabelle 1 angegebenen Mittelwerte zeigen, daß im wesentlichen leichtlösliche Chloride und nur unwesentlich Schwermetalle, die meistens als schwerlösliche Metalloxide vorliegen, ausgelaugt werden.

Die Inhaltsstoffe im Abwasser [5] liegen **ohne** zusätzliche Behandlungsverfahren in der Regel unter den Grenzwerten der Entwässerungssatzungen bzw. den Richtwerten nach A 115 (ATV) (die zulässigen Grenzwerte → Tabelle 3).

4 Auslagverhalten der gewaschenen Schlacke

Nach dem LAGA-Merkblatt [3] sollen in gewissen Zeitabständen Untersuchungen der Schlacke auf das Auslagverhalten

Tabelle 2: Restauslaugverhalten der im Naßentascher gewaschenen Schlacke nach DEV-S 4 mit bidestilliertem H₂O (mg/l; mg/kg Schlacke)

Bezeichnung der untersuchten Stoffe	Auslaugung nach LAGA-Merkblatt DIN 38404/5/6 u. 9		
	Schwankungsbereich mg/l	Mittelwert mg/l	Fracht Mittelwert mg/kg Schlacke gewaschen
pH	7,08 – 12,3	10,2	10,2
Abdampfrückstand	970 – 2 050	799	7 990 < zul. 2 %
Glühverlust (550 °C)	1,6 – 5,2	3,2	3,2 < zul. 5 %
Ammonium (NH ₄)	0,41 – 1,20	0,88 (zul. 0,50)	8,8
Nitrat (NO ₃)	0,07 – 2,8	1,10 u.T.	11,0
CSB (O ₂)	27 – 136	60	604
BSS ₅ (O ₂)	5 – 27	17	174
Sulfat (SO ₄)	120 – 635	381 (zul. 240)	3 810
Chlorid (Cl ⁻)	50 – 167	94 u.T.	944
Fluorid (F ⁻)	< 0,1 – 1,21	0,50 u.T.	5,0
Cadmium (Cd)	< 0,0005 – 0,002	< 0,001 u.T.	< 0,01
Kupfer (Cu)	< 0,03 – 0,40	0,14 –	1,40
Nickel (Ni)	0,001 – 0,05	0,006 u.T.	0,06
Chrom (Cr)	< 0,001 – 0,008	0,004 u.T.	0,04
Zink (Zn)	< 0,01 – 0,68	0,18 –	1,80
Blei (Pb)	< 0,001 – 0,09	0,030 u.T.	0,30
Wassergehalt %	6,8 – 17	9,8	9,8

u.T. = Konzentration unter Trinkwasserverordnung

halten einiger definierter Inhaltsstoffe durchgeführt werden.

Auch die nach dem Bamberger Verfahren gewaschene Asche wird auf ihr Auslaugverhalten nach den entsprechenden DIN-Normen 38404/5/6 und 9 untersucht. Die Ergebnisse vgl. → Tabelle 2, wo neben dem Schwankungsbereich der untersuchten Inhaltsstoffe auch deren Mittelwerte angegeben sind. Da bei diesem Auslaugverfahren nur jeweils 100 g Schlacke auf 1 l Waschwasser zugegeben werden, müssen zur Errechnung des Auslaugverhaltens in mg/kg gewaschener Schlacke die Konzentrationen mit dem Faktor 10 multipliziert werden.

Bei dem Vergleich der Mittelwertkonzentrationen mit den Grenzwerten nach der Trinkwasserverordnung [6] zeigt sich, daß mit Ausnahme der organischen Verschmutzungen die Grenzwerte in der Regel unterschritten werden. Für Kupfer und Zink sind keine Grenzwerte angegeben, da diese Schwermetalle in Wasserleitungsrohren oftmals eingesetzt werden und dadurch zu hohen Konzentrationen im Trinkwasser führen können. Der Sulfatgehalt spielt nur dann eine Rolle, wenn die Beständigkeit von Betonrohren zu beachten ist.

Die hier gefundenen Auslaugergebnisse werden auch durch Langzeituntersuchungen in Bamberg [7] und bei einer Baumaßnahme nach [22] bestätigt. Im Rahmen einer Felduntersuchung wurde das gesamte Sickerwasser eines Schlackeweges (Breite ca. 3 m, Schlackestärke 15 – 20 cm, Länge 30 cm) untersucht. Dieser Schlackeweg besaß nach oben keine Abdichtung. Das anfallende Sickerwasser wurde in dichten Folien aufgefangen und anschließend analysiert. Trotz saurem Regen wies das Sickerwasser keine Analyseergebnisse auf, die die Werte der Trinkwasserverordnung überschritten.

Tabelle 3: Vergleich auflagebedingter Grenzwerte für Trinkwasser und Abwassereinstufung

Bei Überschreiten zulässiger Grenzwerte nach A 115/EWS genehmigungspflichtige Abwasserbehandlungsanlage erforderlich	Abwasser			Trinkwasser		
	Grenzwerte nach A115 [1] /EWS [2] mg/l	Inhaltsstoffe	Schwellenwerte		Trinkwasser- verordnung [4] mg/l	Höchstkonzentration nach EG [5] mg/l
			nach VGS [3] mg/l	g/h		
≤ 1	Arsen (As)	0,05	1	0,04	0,05	
≤ 2	Blei (Pb)	0,2	8	0,04	0,05	
≤ 0,5	Cadmium (Cd)	0,02	0,4	0,005	0,005	
≤ 3	Chrom ges (Cr)	0,2	8	0,05	0,05	
≤ 1	Cyanide (CN ⁻)	-	-	0,05	0,05	
≤ 60	Fluorid (F ⁻)	-	-	1,5	1,5	
-	Nitrate (NO ₃ ⁻)	-	-	50	50	
≤ 0,05	Quecksilber (Hg)	0,005	0,1	0,001	0,001	
≤ 1	Selen (Se)	-	-	0,001	0,01	
≤ 600	Sulfate (SO ₄ ⁻)	-	-	240	250	
≤ 5	Zink (Zn)	-	-	-	-	
≤ 3	Nickel (Ni)	0,2	8	0,05	0,05	
≤ 2	Kupfer (Cu)	0,3	12	-	0,1	
≤ 200	Aluminium (Al ³⁺)	-	-	0,2	0,2	
≤ 20	Nitrite (NO ₂ ⁻)	-	-	0,1	0,1	
≤ 200	Ammonium (NH ₄ ⁺)	-	-	0,5	0,5	
≤ -	Antimon (Sb)	-	-	-	0,01	
≤ 100	Phenole (C ₆ H ₅ OH)	-	-	-	-	
≤ 5	halogenierte Kohlenwasserstoffe	0,5	10	-	-	

Bei Abwasserableitung unter Schwellenwerten für Konzentration oder Fracht keine Genehmigungspflicht

5 Prozentuale Aufteilung einiger Schadstoffe auf den Schlacke- und Rohgaspfad einschließlich deren Auslagverhalten

Durch umfangreiche Schadstoffbilanzen unter Beachtung sämtlicher Stoffströme ist es gelungen, die Frachten maßgeblicher Schwermetalle und Salze [8] für das heterogene Aufgabeprodukt Müll zu ermitteln [9, 10, 11, 12].

In Spalte 2 sind die Frachten der wesentlichen Elemente pro Mg Müll angegeben. Spalte 4 und 5 zeigen die prozentuale Aufteilung auf die Schlacke und das Rohgas, Spalte 5 und 6 das qualitative Auslagverhalten der Inhaltsstoffe bei

Tabelle 4: Prozentuale Verteilung maßgebender Schwermetalle in Schlacke und Rohgas sowie deren Auslagverhalten bei pH = 7 und pH = 4

Bezeichnung	Menge g/Mg Müll	Proz. Aufteilung		Auslagverhalten nach DEV-S4	
		Schlacke %	Rohgas %	pH = 7	pH = 4
Hg	4	5	95	gering	gering
Cd	10	10	90	mittel	groß
Cl ⁻	7 500	15	85	groß	groß
As	4	25	75	kein Nachw.	kein Nachw.
F ⁻	100	62	38	mittel	mittel
Pb	500	67	33	gering	gering
Zn	1 900	73	27	gering	groß
Cu	500	93	7	gering	mittel
Ni	85	93	7	gering	groß
Cr	250	94	6	gering	gering

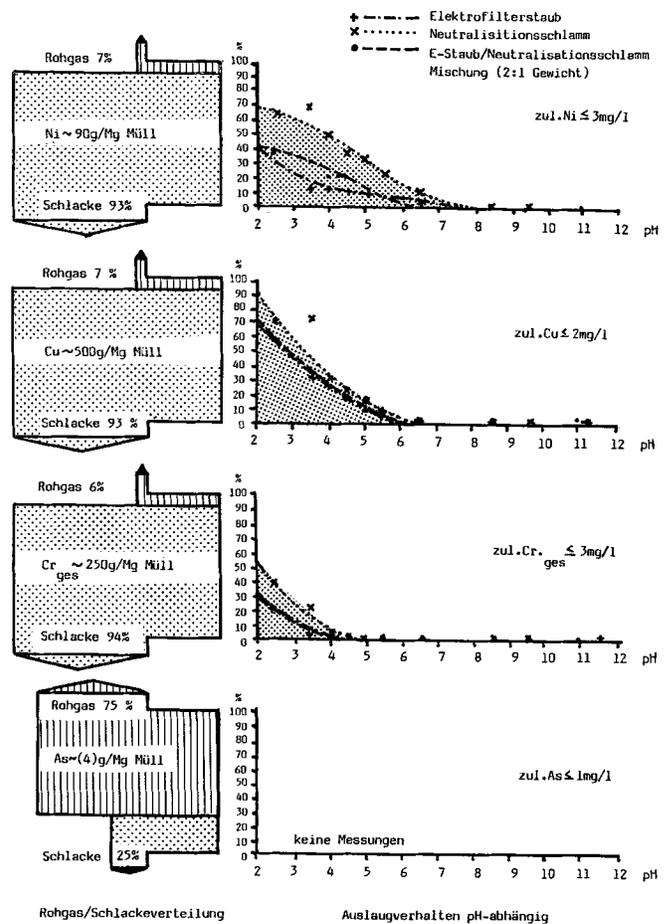
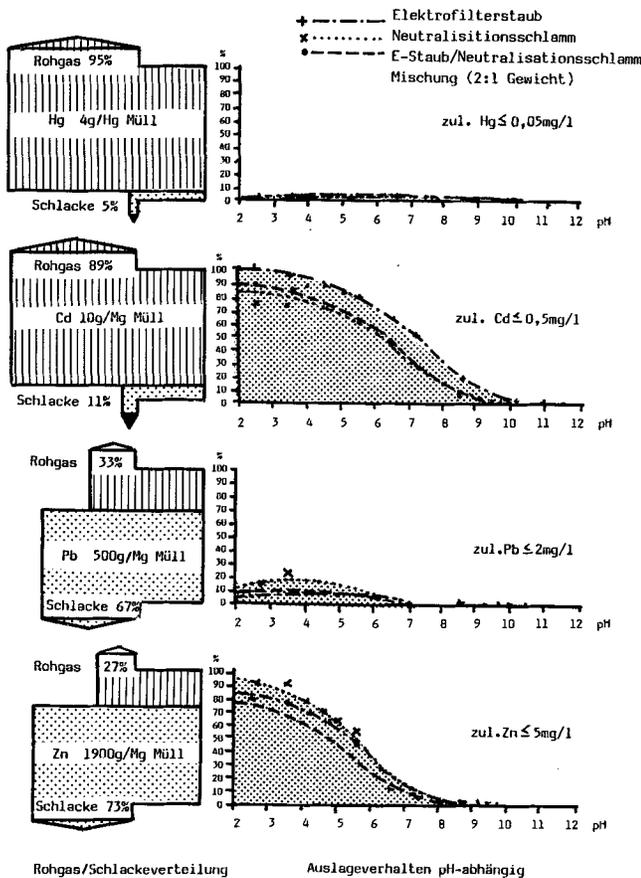


Abbildung 2a und 2b: Schwermetalle Hg, Cd, Pb, Zn, Ni, Cu, Cr und As im Müll – Verteilung auf Rohgas/Schlacke und Auslagverhalten



pH=7 und pH=4. Besondere Bedeutung kommt dabei denjenigen Schadstoffen und Salzen zu, die hauptsächlich in der Schlacke enthalten sind, und die eine hohe Fracht und gleichzeitig ein mittleres bzw. großes Auslagverhalten aufweisen.

Wegen ihres Auslagverhaltens bei niedrigen pH-Werten (pH 4 durch sauren Regen bzw. CO₂ innerhalb Deponien) sind insbesondere Chlorid, Cadmium, Zink und Nickel zu beachten. Fluorid und Kupfer weisen demgegenüber nur ein mittleres Auslagverhalten auf.

Die in → Tabelle 4 angegebenen qualitativen Bewertungen über das Auslagverhalten bei pH 4 und 7 sind in den Abb. 2a und 2b über dem pH-Bereich von 2–12 dargestellt [12, 13]. Bei Einsatz der Schlacke in der Natur kann durch sauren Regen bzw. in Deponien durch CO₂ nur eine pH-Absenkung erwartet werden, sodaß Untersuchungen mit dem pH-Wert >12 für die Schlackeverwertung nicht von Bedeutung sind.

Cadmium gelangt z.B. bei einer Normalverbrennungstemperatur von 800–1 000 °C zu 90 % ins Rohgas, nur 10 % verbleiben in der Schlacke. Bei höheren Verbrennungstemperaturen kann der Anteil in der Schlacke noch weiter vermindert werden. Die Fracht in der Schlacke ist

sehr gering und führt auch bei sehr hohem Auslaugverhalten und niedrigem pH-Wert zu keiner kritischen Konzentration. Weitere Details → Abb. 2a, 2b.

6 Inhaltsstoffe in Erdkruste und in MVA-Schlacke

Soll Schlacke als Baustoff Verwendung finden, bedarf es nicht nur der Kenntnis über die Inhaltsstoffe, sondern ebenfalls einer **umweltrelevanten Beurteilung** dieser Stoffe.

In → Tabelle 5 sind in der 2. Spalte die in der Erdkruste vorhandenen Frachten verschiedener Elemente [14, 15] aufgeführt.

Bei der vergleichenden Beurteilung der Inhaltsstoffe Schlacke – Erdkruste wurden nur die möglicherweise unerwünschten Inhaltsstoffe einbezogen. In den Spalten 3 und 4 der → Tabelle 4 sind die Inhaltsstoffe der Schlacke aufgeführt, wobei fast alle Bamberger Schadstoffkonzentrationen durch gute Feuerführung im unteren Bereich der Schweizer Ergebnisse liegen [16]. Ein erhöhter Wert stellt sich für Quecksilber ein. Da jedoch Quecksilber (Hg), wie → Abb. 2a zeigt, fast nicht auslaugbar ist, spielt Hg bei der Betrachtung möglicher Gefährdung durch die Schlacke eine untergeordnete Rolle. Neben den Inhaltsstoffen wurde auch ein Anreicherungsfaktor (AF) aufgeführt. Als Anreicherungsfaktor wird dabei das Verhältnis zwischen Inhaltsstoffen der Schlacke zu Inhaltsstoffen der Erdkruste definiert [16].

Bei unbehandelter Schlacke liegt der AF für Chlorid bei ca. 30. Das bedeutet, daß ca. 30 mal soviel Chloride in der unbehandelten Schlacke anzutreffen sind wie in der Erdkruste. Bei Fluorid liegt der umgekehrte Fall vor; es wird bedeutend weniger Fluorid in der Schlacke gefunden als in der Erdkruste. Die AF-Werte für unbehandelte Schlacke liegen für Nickel, Chrom und Quecksilber unter 10, für Cadmium, Kupfer und Chlorid zwischen 20 und 30, und für Zink und Blei bei 60 – 80. Wie bereits erwähnt, wird in Bamberg

die Schlacke gewaschen. Durch dieses Waschverfahren läßt sich im wesentlichen der leichtlösliche Chloridanteil (50 % des Cl) reduzieren, sodaß der AF-Faktor von 30 auf 15 abgesenkt werden kann. Die übrigen Salze und Schwermetalle liegen in der Regel als Oxide und Karbonate oder auch als Hydroxide vor und sind, wie die Auslaugversuche zeigen, meist schwerlöslich. Der nach dem LAGA-Merkblatt [3] vorgeschriebene Nachweis des Auslaugverhaltens führt zu den in den Spalten 9 und 10 aufgeführten Daten. Diese Ergebnisse bestätigen ebenfalls die in → Abbildung 2a und 2b dargestellten Auslaugtrends. Selbst der nach dem DEV-S4 Verfahren ermittelte, viel zu ungünstige und realitätsfremde Auslaugnachweis führt bei den meisten Schwermetallen auch nur zu Auslaugwerten $\leq 1\%$. Besondere Beachtung verdient dabei das Auslaugverhalten von Chloriden, die unabhängig vom pH-Wert immer noch bis zu 47 % auswaschbar sind. Hier könnte – falls auflagenbedingt gefordert – eine Verbesserung der Waschung eine mögliche weitere Cl-Reduzierung erbringen.

In der Schweiz nahe Zürich werden z.Zt. in einer Großversuchsanlage Auswaschversuche für Schlacke in einer Drehtrommel mit anschließender Trocknung und Windsichtung zur Feinstoffabscheidung durchgeführt. Die Betriebsergebnisse stehen noch aus.

In Spalte 12 sind die AF-Werte für kesselaschefreie, gewaschene Schlacke aufgeführt. Nur bei Cadmium ist überhaupt eine merkliche Verringerung des AF-Wertes ohne Kesselasche erzielbar.

Die in → Tabelle 5 aufgeführten AF-Werte vergleichen die Inhaltsstoffkonzentrationen von Schlacke mit denen der Erdkruste. Tatsächlich müßten anstelle von Erdkruste die Inhaltsstoffkonzentrationen der Naturbaustoffe wie Schotter, Kalk u.ä. herangezogen werden.

Sobald entsprechende Untersuchungsergebnisse über Schotter von dem Bundesverband Naturstein-Industrie vorliegen, sollte eine vergleichende Beurteilung der AF-Werte erfolgen.

Tabelle 5: Vergleich Inhaltsstoffe Erdkruste zu unbehandelter, gewaschener und kesselaschefreier MVA Schlacke, Restauslaugbarkeit nach DEV S4 (neutral)

Element	Schlacke unbehandelt						Schlacke gewaschen		Schlacke gewaschen auslaugbar nach DEV S4		Schlacke ²⁾ gewaschen	
	Erdkruste [14] g/kg	Schweiz [15] g/kg	Bamberg Mittelw. ¹⁾ [12] g/kg	AF		Bamberg [12] g/kg	AF	[12, 23] g/kg	‰	Bamberg [24] g/kg	AF	
				CH	Bbg.							
Chlorid (Cl ⁻)	0,13	3 – 6	3,51	35	27	1,97	15	0,94	477	1,78	14	
Fluorid (F ⁻)	0,65	0,2 – 0,4	0,22	0,4	0,3	0,22	0,3	0,005	22	0,22	0,3	
Quecksilber (Hg)	0,00008	0,0001	0,00072	1,3	9	0,0007	9	u.N.	< 0,1	0,00068	8,5	
Cadmium (Cd)	0,0002	0,03	0,004	150	20	0,0038	19	< 0,00001	2,6	0,0029	14,5	
Kupfer (Cu)	0,06	1 – 4	1,52	41	25	1,52	25	0,0014	0,1	1,52	25	
Nickel (Ni)	0,08	0,30	0,26	3,8	3,3	0,26	3,3	0,00006	0,2	0,26	3,3	
Chrom (Cr)	0,1	1 – 10	0,66	55	6,6	0,66	6,6	0,00004	< 0,1	0,62	6,2	
Zink (Zn)	0,07	4 – 15	4,57	140	65	4,57	65	0,0018	0,4	4,47	64	
Blei (Pb)	0,013	1 – 17	1,01	750	78	1,01	78	0,0003	0,3	0,97	75	

AF = Anreicherungsfaktor bezogen auf Erdkruste

1) Schlacke mit Kesselasche
2) Schlacke ohne Kesselasche

o.N. = ohne Nachweis
u.N. = unter Nachweisgrenze

7 Aufbereitung der Schlacke

Die Absiebung und Enteisung der Schlacke erfolgt nach bewährten Techniken, wobei aus 1 Tonne Hausmüll ca. 300 kg Baustoff in den Korngrößen von 0–64 mm, 60 kg Schrott und ca. 20–30 kg Überkorn mit einem $\varnothing > 64$ mm anfallen [17]. Die Langzeitergebnisse zeigen, daß Schrott mit ca. 10–15 % in der Schlacke enthalten ist, gleichbedeutend 4–6 % im Aufgabegut Müll.

Der benötigte Platz für die Zwischenlagerung und die Oberflächen- sowie Sickerwassererfassung der Schlacke ist zu beachten.

7.1 Überkorn $\varnothing > 64$ mm

Das Überkorn besteht meistens aus Grobschlacke, aus Bausteinen, die im Müll mitangeliefert werden und aus verkohltem Holz, angesengten Büchern, Papier- und Kunststoffresten sowie Textilballen und beträgt ca. 5–10 % der Gesamtschlacke. Zur Verhinderung eines zu hohen organischen Anteils im Überkorn kann diese Restschlacke nochmals in den Müllbunker aufgegeben, mit dem Müll vermischt und anschließend ein zweites Mal verbrannt werden. Grundsätzlich besteht die Möglichkeit einer **Überkornaufbereitung**, wobei jedoch wegen der geringen Menge der dafür erforderliche Aufwand z.Zt. kaum vertretbar erscheint. Die Eluatuntersuchungen des Bamberger Überkorns weisen mit Ausnahme von Zink und Quecksilber identische Ergebnisse zu der ausgelauten, gewaschenen Schlacke nach → Tabelle 5 (vorletzte Spalte) auf. Die Quecksilberkonzentration liegt bei 50 %, die von Zink sogar nur bei 10 % der Vergleichswerte.

7.2 Schrott

Bei dem Schrott mit ca. 40–60 kg/Mg Müll (Schrott aus MVAs 1987 ca. 4×10^5 Mg) handelt es sich um ein relativ verschmutztes Produkt. Die Untersuchungen der schrottverwertenden Industrie [2] belegen, daß der Fe-Gehalt in diesem Müllverbrennungsschrott nur bei ca. 50 % liegt. Das verursacht bei der mit Schrott angereicherten Stahlherstellung eine Stahlwerksschlacke mit einem sehr hohen Rest-Fe-Anteil und damit einen schlechten Nutzungsgrad.

Die Verwertung des Müllverbrennungsschrotts erschwert sich zusätzlich durch den im Vergleich zum Normalschrott relativ hohen Kupfergehalt (ca. 0,8 %). Aus vorgenannten Gründen ist es z.Zt. wegen geringer Nachfrage und damit niedriger Schrottpreise äußerst schwierig, die Schrottfraktion aus der Schlacke zu verwerten. Eine Verbesserung läßt sich durch wiederholtes Shreddern sowie Mischen mit hochwertigeren Schrottsorten erreichen, wodurch jedoch zusätzliche Kosten entstehen, die gegebenenfalls zu subventionieren sind. Von seiten der Stahlindustrie bzw. der Schrottaufbereitung werden bis zu 40 DM Subventionen/Mg Schrott aus MVAs genannt [2].

Nach Angaben von MVA-Betreibern bzw. Schlackeaufbereitern [19] kann trotz der ungünstigen Marktsituation für die Schrottverwertung mit einem Nullerlös kalkuliert werden. Abhängig von der Marktsituation, Entfernung zum Stahlwerk, Reinheit des Schrottes usw. lassen sich besten-

falls auch Erträge bis zu 20 DM/Mg Schrott erwirtschaften.

Vor Jahren konnte noch die Schlackeaufbereitung durch Einnahmen aus dem Schrottgeschäft mit Gewinn betrieben werden. Heute sind diese Einnahmen so stark geschrumpft, daß die **gesamte Schlackeverwertung aus ökonomischen Gründen in Frage gestellt werden muß, falls sich die Schrottpreise nicht wieder erholen.**

Bis zu 60 DM/Mg Müllschrott könnten bei getrennter Sammlung des Schrottes aus dem Abfall z.Zt. erzielt werden. Problematisch muß dabei das wenig ertragreiche und nur unwirtschaftlich zu betreibende Erfassungssystem von Schrott und Blech eingestuft werden, da trotz getrennter Erfassung ein Großteil von Fe-Teilen im Müll verbleibt und damit weiterhin in die Müllverbrennung gelangt. Deshalb kann auch für diesen Fall bei einer Schlackeaufbereitung nicht auf eine **Entschrottung** verzichtet werden.

8 Schlacke als Baustoff

Bei der Schlackeverwertung fallen 80 % der Menge als möglicher Baustoff mit einem Schüttgewicht von 1,2–1,3 Mg/m³ und einem verdichteten Raumgewicht von 1,8–1,9 Mg/m³ bei 13–15 % Wassergehalt an. Die hydraulischen Bindeeigenschaften bewirken einen Durchlässigkeitsbeiwert von $k_f = 10^{-7} - 10^{-8}$ m/s, der fast einem Ton ($k_f = 10^{-9}$) entspricht. Die zugehörige Tragfähigkeit liegt um 90–95 MN/m². Dabei sind u.a. das LAGA-Merkblatt [3] und auch das „Merkblatt über die Verwendung von industriellen Nebenprodukten im Straßenbau – Teil: Müllverbrennungsschlacke“ der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen [20] zu beachten.

Trotz der geringen verbleibenden Salzgehalte ist der Einsatz dieses Baustoffes beispielsweise als Dammschüttmaterial, Auffüllstoff, Straßenunterbaumaterial usw. nicht in Wasserschutzgebieten erlaubt.

Wegen möglicher korrosiver Beeinflussung metallischer Leitungen in Verkehrsflächen soll zwischen metallischen Einbauten und der Schlacke ein Mindestabstand von 0,5 m eingehalten werden. Neu zu verlegende Leitungen sind mit Umfüllungen zu versehen, die gegen stark aggressive Böden schützen.

Um die Schlacke auch als **Trag- und Frostschuttschicht** im Straßenbau mit einem k_f ca. 10^{-4} einsetzen zu können, bietet sich die Mischung mit nicht bindigem Material wie Steinkohlenkesselgranulat im Verhältnis von 1:1 bis 1:2 an.

Zur Einhaltung der **Raumbeständigkeit** soll Schlacke vor ihrem Einbau mindestens 3 Monate feucht lagern, um sicherzustellen, daß mögliche Oxidationsprodukte aus Aluminiumhydroxid in dieser Zeit ausgasen können und die Auskristallisation von Sulfoaluminaten abgeschlossen ist [26, 29].

Zur Abdeckung von Garantieansprüchen an Schlackeverwerter im Straßenbau werden z.Zt. von der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswege die RAL-RG

501/2 zur Güte- und Prüfbestimmung von Schlacke sowie weitere Merkblätter und Anforderungen erarbeitet [27, 28]. Sie liegen zum Teil bereits als Entwürfe vor.

Von ausschlaggebender Bedeutung ist auch die gezielte und psychologisch richtige Einsatzart dieser Baustoffe, da u.a. Schlackebaustoffe bei entsprechender Belastung durch Fahrzeuge (Mahleffekt) in Trockenzeiten zu **Staubentwicklung**, und das **Glitzern von Glassplintern** in Schlackebelägen zur Ablehnung durch die Schlackeabnehmer führen können. Schlacke als Baustoff sollte aus vorgenannten „optischen“ Gründen grundsätzlich nur abgedeckt als **Tragschicht, Unterbau, Damminenschüttung** usw. Verwendung finden. Dichte Abdeckmaterialien über dem Schlackebaustoff wie Bitumen, Bitukies, Plattenbeläge usw. verringern oder unterbinden sogar den **Anfall von Sickerwasser** und damit die **Auslaugung** möglicher Salze und Schwermetalle.

9 Verbesserung der Schlackeabsatzmöglichkeiten

Ein weiterer Schritt zur Verbesserung der Akzeptanz und zum Abbau der Vorurteile wegen möglicher Umweltbelastungen von Schlackebaustoffen ist durch Abtrennung der Feinstfraktion < 1 mm aus dem Baustoff zu erwarten. Die Absiebung, Windsichtung o.ä. dieser schadstoffträchtigen Feinstfraktion ermöglicht eine weitere Schadstoffverringern im Baustoff, auch wenn dies nicht durch Auflagen vorgeschrieben und gefordert wird. Die dabei anfallende Feinstfraktion (< 5 % der Schlackemenge) besitzt bis zu 20 % Glühverlust und ist entweder zu deponieren oder kann gemeinsam mit den Stäuben aus der Rauchgasreinigung behandelt werden.

10 Bedeutung der Kessel- und Rostasche in der Schlacke

Aufgrund der Bamberger Kesselasche-Untersuchungsergebnisse aus den 3 Eckkesseln der Müllverbrennung, deren Heizflächen durch Rußblasen mit kalter Druckluft von Belägen intervallweise gereinigt werden, fallen während der **Rußblaszeit** ca. 7 kg Kesselasche/Mg Müll, während der **rußblasfreien Zeit** ca. 3,5 – 3,9 kg/Mg Müll an. Im Mittel entspricht dies einem Kesselascheanfall von 4,8 kg/Mg Müll. Der Rußblaseffekt selbst bewirkt einen Kesselaschemehranfall von ca. 3,5 – 4,0 kg grobe Kesselasche/Mg Müll mit ca. 45 % < 1 mm.

Die Inhaltsstoffe der Kesselasche liegen mit Ausnahme von Thallium bei ca. 20 – 60 % der Konzentrationen von Filterstäuben. Einer Verringerung der Inhaltsstoffe ist möglicherweise durch Verwendung von heißem, überhitztem Dampf statt kalter Druckluft und bei Einsatz kontinuierlich arbeitender Reinigungssysteme (z.B. Klopfer) zu erwarten.

Der prozentuale Anteil von Kesselasche in der Gesamtschlacke liegt für Fluorid, Kupfer, Nickel, Zink, Quecksilber und Blei unter 4 % äußerst niedrig und damit in der Größenordnung von üblichen Meßungenauigkeiten. Bei Chrom mit 6,5 %, Chlorid 10 % und Cadmium ca. 23 % erscheinen vergleichsweise hohe prozentuale Anteile aus

der Kesselasche. Ein Eliminieren dieser anteiligen Inhaltsstoffe durch getrennte Erfassung der Kesselasche würde zu keiner maßgeblichen Verringerung der Anreicherungsfaktoren (AF) in der Schlacke führen, da die Konzentrationen für diese 3 Inhaltsstoffe auch in der Schlacke relativ niedrig sind.

Möglichkeiten zur Verringerung bzw. getrennten Erfassung der Kesselasche in Schlacke sind aus der Veröffentlichung „Einfluß der Kesselasche auf die Qualität von Müllverbrennungsschlacke“ [24] zu entnehmen.

Wegen der im Gegensatz zur Schlacke in der Kesselasche in Minimalkonzentrationen (ppt) nachweisbaren Dioxine und Furane scheint eine getrennte Erfassung der Kesselasche und erneute thermische Behandlung vertretbar.

Über den Einfluß der Asche aus dem Feuerrostdurchfall auf die Schlackequalität liegen bisher noch keine allgemeingültigen quantitativen und qualitativen Aufschlüsse vor.

11 Vermarktungschancen

Der Schlackebaustoff, der Naturprodukte wie Sand, Schotter und Kies ersetzen soll, läßt sich nur zu niedrigeren Preisen als für Naturprodukte und hauptsächlich in Gebieten mit geringen Naturproduktvorkommen vermarkten. Der möglichen Einnahme von 3 – 5 DM/Mg aufbereitetes Schlackematerial stehen Aufwendungen zur Aufbereitung der Rohschlacke von 20 – 25 DM/Mg und erhebliche Transportkosten gegenüber.

Auch bei weitgehender Schlackeverwertung ist für Notfälle und für unverwertbare Reststoffe ausreichendes Deponievolumen bereitzustellen. Von den insgesamt aufbereiteten zwei Drittel Rohschlacke gelangen zur Zeit 80 % in Privatbaumaßnahmen und nur 20 % in den Straßen- und allgemeinen Tiefbau.

Wichtig bei der Verwertung der Schlackebaustoffe ist die Größe des Absatzgebietes. Wenn überregionale Entsorgungsgebiete für die thermische Müllverwertung geschaffen werden [23], muß auch die Rücknahme und Verwertung der aufbereiteten Schlacke innerhalb dieser überregionalen Gebiete erfolgen und nicht auf Einzelregionen beschränkt bleiben. Wird dieser Grundsatz befolgt, läßt sich die anfallende Schlacke tatsächlich absetzen, wie die Betriebsergebnisse einiger Müllverbrennungsanlagen belegen.

Mehr als 60 % der Schlacke wird durch Privatunternehmen aufbereitet, auf Halden zwischengelagert und, soweit möglich, verwertet und vermarktet. Ausschlaggebend für eine erfolgreiche Vermarktung sind neben dem Nachweis und der Einhaltung der geforderten Grenzwerte umfassende Beratung und zuverlässige Betreuung der Schlackeabnehmer. Mögliche Konkurrenzsituationen von Schlackeverwertern (z.B. Bauunternehmern) sollten vermieden werden. Auch extrem „günstige“ Schlackepreise können den Absatz negativ beeinflussen.

Zu beachten ist, daß bei möglichem Konkurs eines Privatunternehmens die Schlackehalden in den Besitz der Kommunen zurückfließen können.

Da sich Überschüsse aus dem Schrottverkauf z.Zt. nicht erwirtschaften lassen und die erzielbaren Preise für den **Recyclingbaustoff Schlacke** zum Teil sehr niedrig liegen, können die Schlackeaufbereiter meistens nicht mehr mit Gewinn arbeiten. Um dennoch die gesetzlich geforderte Schlackeaufbereitung zur Verwertung der Reststoffe auch in Zukunft betreiben zu können, muß deshalb in einigen Fällen **subventioniert** werden.

Von den Schlackeverwertern werden im Gegensatz zu früher heute schon Aufbereitungskosten in Rechnung gestellt. Diese schwanken zwischen 2–20 DM/Mg Rohschlacke. Sie liegen in der Regel jedoch bedeutend niedriger als die **Deponiekosten** für unaufbereitete Schlacke.

Ein direktes Deponieren von Schlacke steht nicht im Einklang mit dem Verwertungsgebot nach dem Abfallgesetz. (Die in einigen Bundesländern sogar vorgeschriebene Deponierung aufbereiteter Schlacke ist kaum verständlich.) – Darunter fällt nicht die **sinnvolle Verwertung** von aufbereiteter oder unaufbereiteter Schlacke **auf Deponien**, wenn sie dort z.B. für *Fahrwegbefestigungen, Abdeck- und Zwischenschichten* eingesetzt und dadurch auf andere Naturbaustoffe verzichtet wird.

Eine weitere Möglichkeit zur Nutzung aufbereiteter Schlacke besteht in der Zumischung problematischer Reststoffe wie Stäube und Schlämme aus der Rauchgasreinigung, kombiniert mit Bindemitteln wie Zement zur Verbesserung des Deponieverhaltens und zur Verringerung der Auslaugbarkeit [9, 11]. Sollten die laufenden Großversuche des Bayerischen Landesamtes für Umweltschutz (LfU) den gewünschten Erfolg bescheren, kann durch Mischung von aufbereiteter Schlacke mit Reaktionsprodukten aus der Rauchgasreinigung und durch Zementzugabe ein so dichtes Reaktionsprodukt geschaffen werden, daß ein **Sickerwasseranfall** fast ausgeschlossen wird [21]. Die Rückstände aus der Rauchgasreinigung könnten dann problemloser entsorgt werden. Auch die Verwendung von aufbereiteter Schlacke zur Herstellung von **Schlackesteinen** wird, mit z.Zt. noch mäßigem Erfolg, praktiziert.

12 Zusammenfassung

Durch eine optimale Feuerführung mit **hohen Verbrennungstemperaturen** sowie einer **gezielten Schlackebehandlung und -aufbereitung** besteht die Möglichkeit, die Hauptfraktionen der Reststoffe aus der Müllverbrennungsanlage mit 350–400 kg/Mg Müll (Schlackeanfall 1987 ca. 2,8 Mio Mg) schadstoffarm zu erzeugen und weitgehend wiederzuverwerten. Mehr als 95 % der Reststoffe aus der thermischen Müllverwertung lassen sich dadurch in den Wirtschaftskreislauf als **Baumaterial** zum Einsparen von Naturprodukten wie Kies, Sand und hauptsächlich Schotter zurückführen und nehmen dadurch kein hochwertiges Deponievolumen in Anspruch. Bewährte Verfahrenstechniken wie das Waschen der Schlacke, die Trennung der Feinstäube aus der Schlacke und das Vermeiden von Kesselasche in der Schlacke können den Gehalt an Salzen und Schwermetallen in der Schlacke weiter verringern, auch wenn dies auflagentgemäß nicht gefordert wird.

Zur weiteren Verbesserung der Akzeptanz von **Schlacke als Baustoff** verhilft nicht nur die Offenlegung der Konzentrationen von Inhaltsstoffen, sondern insbesondere auch die Frachtangabe (mg/m^2) z.B. für eine Schlackewegfläche. Dazu gehört auch das **Abdecken von Schlacke** wegen der Glassplitter und zur Verhinderung von Staubentwicklung. Die Abdeckung der Schlacke hat den weiteren Vorteil, daß kaum Sickerwasser zur Auslaugung der restlichen Inhaltsstoffe anfällt. Die Analysen von Sickerwasser aus Schlackebaustoff liefern Ergebnisse, die größtenteils sogar den Forderungen für Trinkwasserqualität genügen. Bei großen Schütthöhen sind auch **Frachtuntersuchungen** anzustellen.

Da z.Zt. die **Vermarktung der Müllverbrennungsschlacke** und des Schrottes aus der Rohschlacke (Schrottaufkommen 1987 ca. 4×10^5 Mg) zu Schwierigkeiten führt, ergibt sich als zeitbedingte Konsequenz neben der Suche nach neuen Einsatzmöglichkeiten und Märkten die **Subventionierung** der Schlackeaufbereitung. Bis vor kurzem haben die privaten Schlackeaufbereiter noch für die Rohschlacke bezahlt. Dies hat sich grundlegend geändert. Aus diesem Grund können z.Zt. für die Schlackeaufbereitung Kosten entstehen, die von den Schlackeerzeugern an die Schlackeaufbereiter zu zahlen wären [25].

Die vergleichenden Betrachtungen zeigen, daß die möglichen Subventionen für anfallende Aufbereitungs-, Verwertungs- und Restentsorgungskosten, die als Gebühr von den Bürgern zu zahlen sind, bedeutend niedriger liegen als die Deponierungskosten für Schlacke.

Die Verwertung der Schlacke aus Müllverbrennungsanlagen ist deshalb nicht nur ein Gebot der Stunde, sondern zur Erfüllung der Forderungen nach Reststoffverwertung und dem Einsatz reststoffarmer Verfahren gemäß AbfG und BImSchG vorgeschrieben.

Literatur

- [3] Merkblatt der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall: Verwertung von festen Verbrennungsrückständen aus Hausmüllverbrennungsanlagen. LUMBI Nr. 5, 31. 10. (1985)
- [11] Schweizer Bundesamt für Umweltschutz: Behandlung und Verfestigung von Rückständen aus Kehrichtverbrennungsanlagen. Schriftenreihe Umweltschutz Nr. 62 (4/1987)
- [12] D. O. REIMANN: Schwermetalle, anorganische Schadstoffe im Hausmüll und ihre Verteilung auf die feste und gasförmige Phase. VDI-B Handbuch, BW 43-42-01/02/8208 Febr. (1987) und Febr. (1988) und VGB-Kraftwerkstechnik, Heft 8 (1988)
- [18] D. O. REIMANN: Reststoffe aus der Rauchgasreinigung von Müllverbrennungsanlagen. VDI-B Handbuch, BW 43-42-01/02/7468 Febr. (1987) und Febr. (1988)
- [19] B. RIECHMANN, KOO CHEUL SHIN: Stand der Schlackeverwertung in der Bundesrepublik. Wasser, Luft und Betrieb (wlb) Heft 5 (1988)
- [20] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: Merkblatt über die Verwendung von industriellen Nebenprodukten im Straßenbau – Teil: Müllverbrennungssasche. Köln (1986)¹

¹ Die Literaturübersicht stellt eine Auswahl dar. Die in der Folge [1] bis [29] nicht angeführten Literaturstellen können auf Wunsch direkt beim Autor abgerufen werden.