

## Die weitergehende Aufbereitung von Müllverbrennungsschlacke nach dem Verfahren der Scherer + Kohl GmbH

Thomas Lück

1.	Entstehung von MVA-Schlacke .....	622
1.1.	Zusammensetzung und Mineralogie von MVA-Schlacken ....	622
1.2.	Alterung von MVA-Schlacke .....	624
1.3.	Verwertung mechanisch aufbereiteter MVA-Schlacke .....	625
1.4.	Thermische Behandlung von MVA-Schlacke .....	628
1.5.	Stand der Technik der MVA-Schlackenaufbereitung .....	629
1.6.	Kriterien der weitergehenden Aufbereitung von MVA-Schlacken .....	630
2.	Verfahren der Unternehmensgruppe Scherer + Kohl zur weitergehenden Aufbereitung von MVA-Schlacke .....	631
2.1.	Verfahrensübersicht .....	631
2.2.	Schlackenalterung und trockene Aufbereitung .....	633
2.3.	Nasse Verfahrensstufe .....	634
2.4.	NE-Metallschrottsortierung .....	635
2.5.	Massenbilanz und Qualität des Schlackeproduktes .....	637
3.	Fazit .....	640
4.	Literatur .....	640

Im Folgenden wird ein von der Unternehmensgruppe Scherer + Kohl, Ludwigshafen entwickeltes Verfahren zur weitergehenden Aufbereitung von Müllverbrennungsschlacke vorgestellt. Durch das Verfahren werden hochwertige Sekundärbaustoffe, Eisenschrott unterschiedlicher Körnung und NE-Metallgemische hergestellt. Unverbranntes und andere nichtmetallische oder nichtmineralische Komponenten werden weitgehend aussortiert und zur beliefernden Müllverbrennungsanlage zurückgeführt.

Seit 1998 wird in Ludwigshafen eine auf diesem Prinzip basierende Anlage im industriellen Maßstab betrieben. Die dort gewonnenen Sekundärbaustoffe und Metallfraktionen werden im Rhein-Neckar-Raum und überregional unter Beachtung relevanter Umweltbestimmungen und behördlicher Auflagen tiefbautechnisch und metallurgisch verwertet.

*Kap. 1.*

## **Entstehung von MVA-Schlacke**

Müllverbrennungsschlacken sind feste Rückstände, die bei der thermischen Behandlung von Siedlungsabfällen in Müllverbrennungsanlagen (MVA) entstehen und über den Ofenpfad ausgetragen werden. Die einzelnen Verbrennungslinien moderner Müllverbrennungsanlagen verfügen meist über mehrere unabhängig steuerbare Regeleinrichtungen, die es ermöglichen, die brennbaren Bestandteile des Abfalls fast vollständig bei über 850 °C zu verbrennen. Dies führt zu einer Gewichtsreduktion um 65 bis 75 Massenprozent, d.h. bei der Verbrennung von einer Tonne Haus- und Gewerbemüll fallen je nach Zusammensetzung des eingesetzten Siedlungsabfalls neben den Rückständen der Abgasreinigung, den Kesselaschen und Filterstäuben etwa 250 bis 350 kg Müllverbrennungs-Rohschlacke an.

Diese Schlacke hat nach einer Durchlaufzeit von bis zu neunzig Minuten eine Temperatur von 500 bis 600 °C [2, 18]. Sie wird daher vor der sich anschließenden Entsorgung, gemeinsam mit dem Rostdurchfall, zunächst in einem Nassentschlacker abgekühlt. In diesem Stadium wird das Material als Müllverbrennungs-Rohschlacke bezeichnet.

*Kap. 1.1.*

## **Zusammensetzung und Mineralogie von MVA-Schlacken**

Müllverbrennungsschlacke ist ein inhomogenes, partikelförmiges Stoffgemisch. Ihre Beschaffenheit und Zusammensetzung wird zum einen von der Abfallzusammensetzung und zum anderen von den Prozess- d.h. Verbrennungsbedingungen wie der Ofentemperatur, der Verweilzeit auf dem Rost und der Homogenisierung des Abfalls vor der Aufgabe auf den Rost bestimmt.

Tabelle 1 beschreibt die chemische Zusammensetzung von Rohasche.

Müllverbrennungsschlacken können in erster Näherung über die Ausbrandparameter Glühverlust und TOC-Gehalt (Total Organic Carbon) charakterisiert werden. Diese sind ein Maß für die Vollständigkeit des vorangegangenen Verbrennungsvorgangs und indirekt auch für den Grad der Inertisierung des behandelten Abfalls und für die Zerstörung oder Einbindung von Schadstoffen in die Schlacke.

Die Schlacke unterliegt nach ihrem Austrag komplexen Alterungsreaktionen. Dabei handelt es sich im Wesentlichen um Mineralneu- und -umbildungen, bei denen zunächst noch verfügbare Inhaltsstoffe weitgehend inertisiert werden und die spezifische Oberfläche i.d.R. zunimmt.

## Verfahren der Scherer + Kohl GmbH zur weitergehenden Schlackeaufbereitung

Tabelle 1: Chemische Zusammensetzung der Rohasche aus Müllverbrennungsanlagen (nach Pfrang-Stotz)

	Asche (frisch)			Asche (drei Monate gelagert)		
Einheit	Ma.-%					
Parameter	Arithm. Mittel	Min.-Wert	Max.-Wert	Arithm. Mittel	Min.-Wert	Max.-Wert
SiO <sub>2</sub>	49,2	42,91	64,84	49,2	39,66	60,39
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12	9,74	13,71	12,7	8,41	17,81
CaO	15,3	10,45	21,77	15,1	10,42	23,27
K <sub>2</sub> O	1,05	0,83	1,36	0,91	0,84	1,42
TiO <sub>2</sub>	1,03	0,65	1,33	0,88	0,65	1,12
MnO	0,14	0,06	0,22	0,17	0,1	0,26
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8,5	6,58	10,79	8,83	7,43	10,45
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,91	0,55	1,49	1,04	0,5	2,61
MgO	2,69	1,79	3,4	2,59	1,84	3,51
Na <sub>2</sub> O	4,3	1,86	5,81	4,15	2,05	7,49
CO <sub>2</sub>	5,91	2,56	10,96	5,83	3,59	7,62
Sulfat	15,3	2,5	28,3	12,5	5,8	22,5
Chlorid	3,01	1,3	7	2,71	1,5	4,6
Einheit	ppm					
Chrom	648	174	1.035	655	295	1.617
Nickel	215	55	316	165	90	260,2
Kupfer	2.151	935	6.240	2.510	1.245	5.823
Zink	2.383	1.200	4.001	3.132	1.795	5.255
Blei	1.655	497	3.245	2.025	1.108	3.900

Die Massenanteile der Inhaltsstoffe variieren je nach Verbrennungstechnik, -temperatur und Restabfallzusammensetzung. Pretz [17] gibt als Anhaltsgröße folgende durchschnittliche Schlackenzusammensetzung an:

- mineralische Fraktion 85 bis 90 Massenprozent,
- Unverbranntes 1 bis 5 Massenprozent,
- Metallschrott 7 bis 10 Massenprozent.

Die mengenmäßig bedeutendste Gruppe ist naturgemäß die mineralische Fraktion. Diese besteht neben Schlackestücken und Asche auch aus Bestandteilen wie Beton, Ziegeln, Steinen und Glas. Diese bauschuttähnlichen Komponenten werden auch als Durchläufermaterialien bezeichnet. Laut Literaturangabe [9, 10] sind etwa vierzig Massenprozent der mineralischen Schlackenanteile amorph – Gläser, Keramik, Aschen – und sechzig Massenprozent kristallin – neu gebildete Minerale.

Nicht oder nur teilweise verbranntes Material wird in der Stoffgruppe *Unverbranntes* zusammengefasst (1 bis 5 Massenprozent). In dieser finden sich Papier-, Holz-, Kunststoff- und Textilreste wieder.

Der Metallschrott (7 bis 10 Massenprozent) besteht aus NE- und Eisenmetallen. Weißblech (z.B. Dosenschrott), Aluminium und seine Legierungen, Kupfer, Messing, Ölfilter, Wasserhähne u.s.w. sind die wesentlichen Komponenten dieser Stoffgruppe. Die thermischen Bedingungen während der Müllverbrennung führen zu einem vollständigen oder teilweisen Schmelzen und auch zur Oxidation der metallischen Komponenten. Durch Kontakt angeschmolzener Schrottstücke mit anderen Partikeln (Sintern) entstehen Agglomerate mit ausgeprägten Verwachsungseigenschaften. Dabei handelt es sich überwiegend um oberflächliche Verwachsungen mit mineralischen Komponenten, die durch eine moderate mechanische Kornbeanspruchung wieder aufgelöst werden können.

Neben diesen Hauptbestandteilen sind in Müllverbrennungsschlacken Alkali- und Erdalkaliverbindungen, Chloride (in der Regel  $> 1$  g/kg), Fluoride ( $> 1$  g/kg), Sulfate sowie unterschiedliche schwerflüchtige Schwermetalle und deren Verbindungen enthalten. In Abhängigkeit von den Verbrennungsbedingungen und dem jeweiligen Dampfdruck der Schwermetalle reichern sich diese in der Schlacke in unterschiedlichen Konzentrationen an. Die Belastung mit Dioxinen und Furanen fällt bei Schlacken im Vergleich zu den übrigen Rückständen der Müllverbrennung – beispielsweise Filterstäuben – deutlich geringer aus.

Die Aschen und Schmelzprodukte unterscheiden sich sowohl morphologisch als auch in der Korngröße. Die Aschen werden aus Glasabrieb, anorganischen und organischen Rückständen sowie Ruß- und Staubpartikeln mit einer durchschnittlichen Größe von kleiner 0,002 bis 2 mm gebildet.

Demgegenüber stellen die Schmelzprodukte stark poröse, unregelmäßig geformte Mineralkörner einer Partikelgröße von größer 2 mm dar, die aus einer silikatischen Matrix (Glas) mit kristallinen Neubildungen (Silikate und Oxide) bestehen [16, 21, 22]. Amorphe Glasphasen entstehen als Erstarrungsprodukte während des Abschreckens der Verbrennungsrückstände im Nassentschlacker. Sie zeigen typischerweise ein Fließgefüge – Einregelung der Kristalle, lagige Pigmentierung, Glasbläschen –, welches einer zähen Schmelze entspricht.

Aus mineralogischer Sicht stellt die Müllverbrennungsschlacke ein mit Eisen durchsetztes Calcium-Aluminium-Silikat dar, das in seinen Hauptbestandteilen natürlichen Gesteinen der Erdkruste wie Basalten oder Andesiten gleicht. Dabei liegen die Gehalte an Schwermetallen, Chlor und Schwefel üblicherweise über den Werten natürlicher Gesteine.

### *Kap. 1.2.*

## **Alterung von MVA-Schlacke**

Die in Rostschlacken auftretenden mineralogischen Komponenten sind unter den praxisüblichen Lagerungsbedingungen nebeneinander nicht stabil. Dies löst im Nassentschlacker und bei der sich anschließenden Zwischenlagerung eine

Reihe komplexer geochemischer Prozesse aus, die als Alterungsvorgänge bezeichnet werden. Dabei handelt es sich vorwiegend um Verfestigungsreaktionen (Carbonatisierung), Glas- und Metallkorrosionen (Oxidation und/oder Hydratation) sowie um Lösungs- und Fällungsreaktionen.

Die glasigen Neubildungen reagieren beispielsweise in Anwesenheit von Wasser nach Gelbildung mit dem in der Schlacke vorkommenden Calciumhydroxid (Portlandit) zu Calciumaluminatsilikat-Hydraten. Diese Reaktion wird durch die Zunahme der spezifischen Oberfläche im Zuge der Alterung begünstigt. Eine umweltrelevante Eigenschaft der neugebildeten Calciumaluminatsilikat-Hydrate ist deren Fähigkeit, als *Speicherminerale* Schwermetalle zu binden und so deren Mobilität herabzusetzen [1, 8, 15]. Limitierend für eine langfristige Immobilisierung der Schwermetalle ist allerdings die Mineralstabilität unter veränderten Milieubedingungen bei der langfristigen LagXäung oder Verwertung (pH-Wert, Redoxpotential, Temperatur usw.) [2].

### *Kap. 1.3.*

## **Verwertung mechanisch aufbereiteter MVA-Schlacke**

Die Verwertung von Müllverbrennungs-Rohschlacken im Tiefbau ist wegen der dort möglichen Auswaschung von Salzen und Schwermetallen in der zunächst vorliegenden, unbehandelten Form, d.h. ohne weitere Vorbehandlung, ökologisch inakzeptabel. Im Unterschied zur Deponie kann das Sickerwasser hier nicht kontrolliert gesammelt und behandelt werden, sondern gelangt diffus in den Boden und gegebenenfalls in das Grundwasser. Daher erfordert die Verwertung von Schlacke eine weitere Reduzierung eluierbarer Bestandteile durch eine geeignete Aufbereitung.

Zielsetzung der Schlackenaufbereitung ist es, absatzfähige d.h. marktfähige, umweltgerechte Produkte herzustellen. Entscheidend für einen wirtschaftlichen Betrieb der Aufbereitungsanlage ist das Erreichen der Qualitätsanforderungen der jeweiligen Abnehmer, Bauträger, Aufsichtsbehörden und des Gesetzgebers.

Durch das 1994 veröffentlichte Merkblatt der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) *Merkblatt über die Entsorgung von Abfällen aus Verbrennungsanlagen für Siedlungsabfälle* und die dazugehörigen Technischen Regeln *Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Reststoffen/Abfällen – Technische Regeln* [13] fand eine Vereinheitlichung der Untersuchung, Bewertung und Verwertung von Schlacken aus Müllverbrennungsanlagen statt. Dort werden Anforderungen an charakteristische Stoffparameter, Güteüberwachungskriterien, Anforderungen an den Einsatz von Schlacke im Straßenbau usw. definiert. Für eine Verwertung der Müllverbrennungsschlacken sollten zur Qualitätssicherung zumindest die Rückstände separiert, die Eisenfraktion abgetrennt und die Schlacken klassiert werden.

Da *frische* Müllverbrennungsschlacke sehr reaktionsfähig ist und bereits im Nassentschlacker durch den Kontakt mit Wasser und Sauerstoff exotherme Umwandlungsprozesse stattfinden, schreibt die LAGA eine dreimonatige Zwischenlagerung bei ausreichender Bewässerung und Luftzufuhr vor. Durch eine definierte Alterung der Schlacken vor der Verwertung lässt sich so insgesamt eine deutliche Verringerung der Schadstoffmobilitäten [14] erreichen.

Die *Technischen Regeln* der LAGA nennen Vorgabewerte und Verwertungsbedingungen, die den umweltverträglichen Einbau der Schlacke im Straßen- und Wegebau im Interesse der Umweltvorsorge regeln sollen.

***Einbaubedingungen für die Verwertung von Müllverbrennungsschlacken (Auszug)***

- *Gedeckter Oberbau mit Asphalt, Beton.*
- *Der Abstand zwischen Schüttkörperbasis und dem höchsten zu erwartenden Grundwasserstand soll mindestens 1 m betragen.*
- *Kein Einbau in festgesetzten bzw. geplanten Trinkwasserschutzgebieten und Wasservorranggebieten.*
- *Kein Einbau in Gebieten mit häufigen Überschwemmungen, in hydrogeologisch ungünstigen Standorten, auf Flächen mit sensibler Nutzung (z.B. Kinderspielplätze, Sportanlagen, Dränschichten usw.).*
- *Bei direktem Kontakt mit korrosionsanfälligen Einbauten ist ein Mindestabstand von 50 cm einzuhalten.*

Tabelle 2 nennt die in Deutschland gebräuchlichen Richtwerte für das Eluat aufbereiteter Müllverbrennungsschlacken.

Grundsätzlich gilt, dass die o.g. Zuordnungswerte gemäß LAGA als Orientierungswerte zu betrachten sind. Abweichungen von den Zuordnungswerten können zugelassen werden, wenn durch Analysenergebnisse im Einzelfall der Nachweis erbracht wird, dass ggf. weitere gleichfalls umweltverträgliche Verwertungsmöglichkeiten der jeweiligen Abfälle bestehen und hierbei das Wohl der Allgemeinheit nicht beeinträchtigt wird.

Auch im Merkblatt über die *Verwendung von industriellen Nebenprodukten im Straßenbau, Teil: Müllverbrennungsschlacke (MV-Asche)* werden die Einbaubedingungen näher beschrieben. Grundsätzlich sind als Anwendungen Tragschichten ohne Bindemittel und mit bituminösen Bindemitteln, Befestigung ländlicher Wege und Nebenflächen, Bodenverfestigung, Unterbau und Lärmschutzwälle möglich. Weitere Anforderungen für die Verwendung von Rückständen im Straßenbau sind in ZTVT-StB 95 [4] aufgeführt.

Pretz geht davon aus, dass Ende der neunziger Jahre etwa zwei Drittel der in Deutschland anfallenden Müllverbrennungsschlacke aufbereitet und überwiegend im Bausektor verwertet wurden. Dieser Anteil ist seit einigen Jahren aufgrund konjunktureller Entwicklungen der Baubranche und aufgrund steigender Qualitätsansprüche der Abnehmer rückläufig und liegt mittlerweile bei 50 bis 60 %.

## Verfahren der Scherer + Kohl GmbH zur weitergehenden Schlackeaufbereitung

Tabelle 2: Zusammenfassung der relevanten Richtwerte für das Eluat aufbereiteter Aschen aus Müllverbrennungsanlagen zur Beurteilung von Schlackenverwertungsmaßnahmen (nach Reimann)

Parameter	Einheit	LAGA-Merkblatt <sup>1</sup>	Oberste Baubehörde im Bay. Staatsministerium des Inneren <sup>2</sup>		NRW-Ministerialblatt <sup>3</sup>	TASi <sup>4</sup>	
			Richtwert 1	Richtwert 2		DK 1	DK 2
pH-Wert		7–13			7–13	5,5–13	5,5–13
Leitfähigkeit	µS/cm	6.000	2.000 ± 100	8.000 ± 400	5.000	≤ 10.000	≤ 50.000
TOC <sup>5</sup>	mg/l		5 ± 1	20 ± 4		≤ 20	≤ 100
Phenole	mg/l					≤ 0,2	≤ 50
Arsen (As) <sup>6</sup>	mg/l					≤ 0,2	≤ 0,5
Blei (Pb)	mg/l	0,05	0,04 ± 0,004	0,16 ± 0,016	0,05	≤ 0,2	≤ 1
Cadmium (Cd)	mg/l	0,005	0,005 ± 0,001	0,02 ± 0,004	0,05	≤ 0,05	≤ 0,1
Chrom-VI (Cr)	mg/l				0,05		
Chrom gesamt (Cr)	mg/l	0,2	0,05 ± 0,005	0,2 ± 0,02			
Kupfer (Cu)	mg/l	0,3	0,05 ± 0,005	0,2 ± 0,02	0,3	≤ 1	≤ 5
Nickel (Ni)	mg/l	0,04	0,05 ± 0,005	0,2 ± 0,02		≤ 0,2	≤ 1
Quecksilber (Hg)	mg/l	0,001				≤ 0,005	≤ 0,02
Zink (Zn)	mg/l	0,3	0,2 ± 0,02	0,8 ± 0,08	0,3	≤ 2	≤ 5
Fluorid (F)	mg/l		1,5 ± 0,15	6 ± 0,6		≤ 5	≤ 25
Ammonium-N (NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> )	mg/l		0,5 ± 0,05	2 ± 0,2		≤ 4	≤ 200
Cyanide leicht freisetzbar	mg/l	0,02				≤ 0,1	≤ 0,5
AOX <sup>7</sup>	mg/l					≤ 0,3	≤ 1,5
Filtrattrockenrückstand	mg/l		2.000 ± 200	8.000 ± 800			
Chlorid (Cl)	mg/l	250	125 ± 12,5	500 ± 50	250		
Sulfat (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )	mg/l	600	250 ± 25	1.000 ± 100	600		
Nitrat (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	mg/l		25 ± 2,5	50 ± 5			
DOC <sup>8, 6</sup>	mg/l						

<sup>1</sup> Angaben aus LAGA-Merkblatt 19

<sup>2</sup> Oberste Baubehörde im Bayerischen Staatsministerium des Inneren, Stand Februar 1993. Die bei den Werten angegebenen Abweichungen berücksichtigen die Messungenauigkeit.

<sup>3</sup> Im Nordrhein-Westfalen-Ministerialblatt-Nr. 43 vom 04.07.1991 wird der Eluatwert in der Einheit mg/kg angegeben. In dieser Tabelle wurden diese Massenkonzentrationswerte auf mg/l umgerechnet, um vergleichbare Werte zu erhalten. Dabei ist wissenswert, dass zur Eluatbestimmung in einem Liter Lösung eine Feststoffprobe von 100 g verwendet wird.

<sup>4</sup> TA Siedlungsabfall:

DK 1 = Deponieklasse 1

DK 2 = Deponieklasse 2

<sup>5</sup> Organischer Kohlenstoff, gesamt

<sup>6</sup> Arsen ist zur Erfahrungssammlung zu bestimmen

<sup>7</sup> Absorbierbare Halogenkohlenwasserstoffe

<sup>8</sup> Gelöster organischer Kohlenstoff

Die Aufbereitung von Müllverbrennungsschlacken geschieht in vielen Fällen durch lokal ansässige Baustoffaufbereiter, die aufgrund ihrer Marktkenntnisse und logistischen Voraussetzungen den fachgerechten Absatz der aus Müllverbrennungsschlacke erzeugten Sekundärbaustoffe sicherstellen können.

Übliche Einsatzgebiete des Tiefbaus für aufbereitete Schlacke sind:

- Frostschuttschicht,
- ungebundene zweite Tragschicht im Straßen- und Wegebau,
- Füll- und Tragschicht im Industrie- und Gewerbebereich,
- Bau von Lärmschutzwällen,
- Rekultivierung von Deponien,
- Ausgleichsmaterial für das Feinplanum.

Speziell aufbereitete Müllverbrennungsschlacke kann auch zur Bodenverfestigung mit Zement oder als hydraulisch gebundene Tragschicht eingesetzt werden.

In Tabelle 3 werden die Verwertungswege von Müllverbrennungsschlacke in Deutschland bewertet [12]. Müllverbrennungsschlacke wird demnach im Wesentlichen als Verfüllmaterial (22 %), Frostschuttschicht (27 %) und Schottertragschicht (11 %) verwertet.

Tabelle 3: Verwertungswege von Schlacke aus Müllverbrennungsanlagen

Verwertungsweg	Einheit	Wert
Landschaftsbau	%	1
Verfüllmaterial	%	22
Lärmschutzwall	%	3
Bodenverbesserung	%	9
Bodenverfestigung/hydraulisch gebundene Tragschicht	%	5
Frostschuttschicht	%	27
Schottertragschicht	%	11
ungebundene Verkehrsflächen/Wegebau	%	1
Sonstiges	%	16
Unterbau/Dammbau	%	5

### *Kap. 1.4.*

## **Thermische Behandlung von MVA-Schlacke**

Eine elegante aber aufwendige Möglichkeit zur Inertisierung von Müllverbrennungsschlacke ist deren thermische Behandlung bei Temperaturen von mindestens 1.300 bis 1.500 °C. Nach rascher Abkühlung der dabei entstehenden Schmelze wird ein glasartiges, schwarzes Schlackengranulat erzeugt, das keine brennbaren, organischen Komponenten mehr enthält und in dem sowohl Salze als auch Schwermetalle in der Matrix fixiert und somit nicht mobilisierbar sind. Eine bautechnische Verwertung dieser Schlackengranulate ist – aus ökologischer



Sicht betrachtet – unbedenklich und öffnet zahlreiche Verwertungswege. Nachteilig für die Verglasung sind allerdings der dazu erforderliche hohe Energiebedarf und die damit verbundenen CO<sub>2</sub>-Emission. So gehen Schätzungen davon aus, dass etwa 70 bis 80 % der in der thermischen Abfallbehandlung freigesetzten Energie allein für diesen Behandlungsschritt benötigt werden [5, 19].

### *Kap. 1.5.*

## **Stand der Technik der MVA-Schlackenaufbereitung**

Im Allgemeinen kann davon ausgegangen werden, dass sich durch die in Deutschland flächendeckend eingeführte Getrenntsammlung von Verpackungsabfällen, Glas, Papier und biogenen Abfällen der zu beseitigende Restmüll in seiner Zusammensetzung gegenüber dem Ende der achtziger Jahre anfallenden Müll deutlich verändert hat. Für die erforderliche Technik und Betriebsführung von Müllverbrennungsanlagen hat sich dadurch jedoch nur wenig geändert, da der Heizwert des Mülls weitgehend gleich blieb. Für die Aufbereitung von Müllverbrennungsschlacke hat sich dadurch jedoch die Menge an aussortierbarem Eisenschrott annähernd halbiert [6].

Die einfachste Form der Müllverbrennungsschlackenaufbereitung ist die Schrottsortierung mit Überbandmagnetscheidern, die oft schon bereits nach dem Nassentschlacker installiert sind. Der Eisengehalt des so erzeugten Eisen- und Stahlgemischs beträgt – je nach Art des Verbrennungssystems – lediglich 50 bis 60 Massenprozent. Die Verunreinigungen bestehen aus an den Metallteilen fest angebackenen Schlacke- und Aschebestandteilen. Dieses Material muss daher vor seiner metallurgischen Verwertung zunächst durch Shreddern in ein stahlwerkstofffähiges Endprodukt mit einem Eisengehalt von etwa 95 Massenprozent und einer Schüttdichte von rund 1 t/m<sup>3</sup> umgewandelt werden.

In den meisten deutschen Aufbereitungsanlagen wird Müllverbrennungsschlacke nach einer Lagerung, die je nach Lagerbedingungen zwischen zwei Wochen und drei Monaten liegt, trocken klassiert und sortiert. In vielen Fällen wird daher auch nicht ausreichend gealtertes Material aufbereitet.

Das Ziel der meist mehrstufigen Klassierung ist es Kornklassen zu erzeugen, die im Tiefbau für jeweils definierte Einsatzzwecke benötigt werden. Derartige Anlagen bestehen i.d.R. aus nicht mehr als drei oder vier Sieben, zwei Magnetscheidern sowie einer Reihe von Förderbändern. Unverbranntes und Nichteisenmetalle werden in manchen Anlagen durch Handsortierung abgetrennt. Es ist offensichtlich, dass mit dieser einfachen Aufbereitungstechnik lediglich gröbere Bestandteile erfasst werden können und die erreichten Ausbringensquoten sehr niedrig sind. Die nicht erfassten Komponenten bleiben im Gutstrom und führen so nicht nur zu einer visuellen Beeinträchtigung sondern auch zu ungünstigen chemisch-physikalischen Eigenschaften des mineralischen Produkts. Die Verwertungsmöglichkeiten dieser einfach aufbereiteten Produkte sind daher auf wenige Einsatzgebiete begrenzt. Die erzielbaren Erlöse sind daher gering.

Ein wichtiger Schritt in Richtung eines höheren Mechanisierungsgrades der Müllverbrennungsschlackeaufbereitung wurde erstmals in der Müllverbrennungsanlage der AVR-Rotterdam realisiert [11]. Diese ist charakterisiert durch folgende Merkmale:

- Zerkleinerung des kompletten Überlaufs der Vorabsiebung > 40 mm,
- Erzeugung eines verdichteten und gereinigten Eisenprodukts,
- Windsichtung zur Rückgewinnung von Unverbranntem,
- Einsatz einer Wirbelstromscheidung zur Rückgewinnung von NE-Metallen aus dem Gutstrom > 40 mm.

Bei diesem Verfahren wird der gesamte Siebunterlauf kleiner 40 mm lediglich einer Magnetscheiderstufe zugeführt und nicht weiter behandelt. Im mehr oder minder mineralischen Endprodukt finden sich daher trotz vorangegangener Windsichtung noch in erheblichem Umfang Störstoffe wie Unverbranntes und NE-Metalle. Die Verwertungsmöglichkeiten sind auch für dieses Produktes beschränkt.

Waschverfahren zur Abscheidung von wasserlöslichen Inhaltsstoffen wie Chloriden oder Sulfaten wurden in den achtziger Jahren im Labor- und Pilotmaßstab erprobt. Die Versuche zeigten deutlich, dass so eine nennenswerte Schadstoffabreicherung erreicht werden kann [3]. Es ist offensichtlich, dass die industrielle Anwendung dieses Verfahrens aufgrund der damit verbundenen Aufwendungen für die Wasserbewirtschaftung zu hohen Kosten führt.

### *Kap. 1.6.*

## **Kriterien der weitergehenden Aufbereitung von MVA-Schlacken**

Die konventionelle Müllverbrennungsschlackenaufbereitung basiert im Wesentlichen auf der Kombination von trockenen Verfahren wie Absiebung, Zerkleinerung, manuelle Sortierung und Magnetscheidung. Auch wenn damit die chemisch-physikalischen Vorgaben der LAGA in der Regel eingehalten werden können, so enthalten diese konventionellen Schlackenprodukte häufig noch visuell identifizierbare Störstoffe – Unverbranntes und NE-Metalle – und werden vom Kunden als Sekundärbaustoff schlecht akzeptiert. Sie müssen daher meist als minderwertiger Sekundärbaustoff, z.B. als Verfüllmaterial oder im Deponiebau i.d.R. durch Subvention des Aufbereiters verwertet werden.

Auch wenn bei einem fachgerechten Einbau – d.h. entsprechend den LAGA-Regeln – die von konventionell aufbereiteter MVA-Schlacke ausgehenden Umweltauswirkungen (Boden, Grundwasser) weitgehend minimiert sind, bestehen sowohl in der Öffentlichkeit, bei Überwachungsbehörden als auch bei öffentlichen und privaten Bauträgern noch erhebliche Vorbehalte gegenüber diesem Sekundärbaustoff.

## Verfahren der Scherer + Kohl GmbH zur weitergehenden Schlackeaufbereitung

Aus Sicht des Aufbereiters bedeutet dies zum einen, dass zur Sicherung des Absatzes und zur Verbesserung der Erlöse nicht nur alle einschlägigen Umweltauflagen lückenlos zu erfüllen sind, sondern, dass auch Verfahren anzuwenden sind, die dem Stand der Technik entsprechen und optimale Produktqualitäten ermöglichen. Dies bedeutet, dass die im Rahmen der weitergehenden Aufbereitung anzuwendenden Verfahren folgende Wirkungen erzielen sollten:

- klar definierte Kornverteilungen, geringe Unter- und Überkornanteile,
- hohe Kornfestigkeiten, scharfkantige Kornoberflächen, geringe Porosität, runde Schlackekörner,
- vollständige Auslese von Unverbranntem,
- maximale Schadstoffentfrachtung, weitgehende Abscheidung von leicht löslichen Salzen,
- weitgehende Aussortierung von Eisenschrott und NE-Metallen in getrennte Fraktionen, auch in den unteren Korngrößenbereichen,
- hohe Reinheiten der abgetrennten Metallprodukte und geringer Störstoffgehalt.

Das Ziel ist es letztendlich, aus Müllverbrennungsschlacken mineralische Produkte zu erzeugen, die anderen Sekundärbaustoffen hinsichtlich ihrer chemisch-physikalischen Eigenschaften mindestens ebenbürtig sind.

### *Kap. 2.*

## **Verfahren der Unternehmensgruppe Scherer + Kohl zur weitergehenden Aufbereitung von MVA-Schlacke**

Die Unternehmensgruppe Scherer + Kohl hat ein Verfahren zur weitergehenden Schlackenaufbereitung entwickelt, das den genannten Anforderungen in hohem Maße gerecht wird.

### *Kap. 2.1.*

## **Verfahrensübersicht**

Bild 1 zeigt eine Übersicht dieses Verfahrens.

Die im frischen Zustand angelieferte Müllverbrennungs-Rohschlacke wird in Betonboxen zwischengelagert. Anschließend wird durch trockene Aufbereitungsverfahren die gealterte Müllverbrennungsschlacke in mehrere Kornklassen getrennt und nach groben unverbrannten Bestandteilen und Metallschrott sortiert. Diese trockene Verfahrensstufe entspricht der in anderen Anlagen praktizierten konventionellen Schlackenaufbereitung.

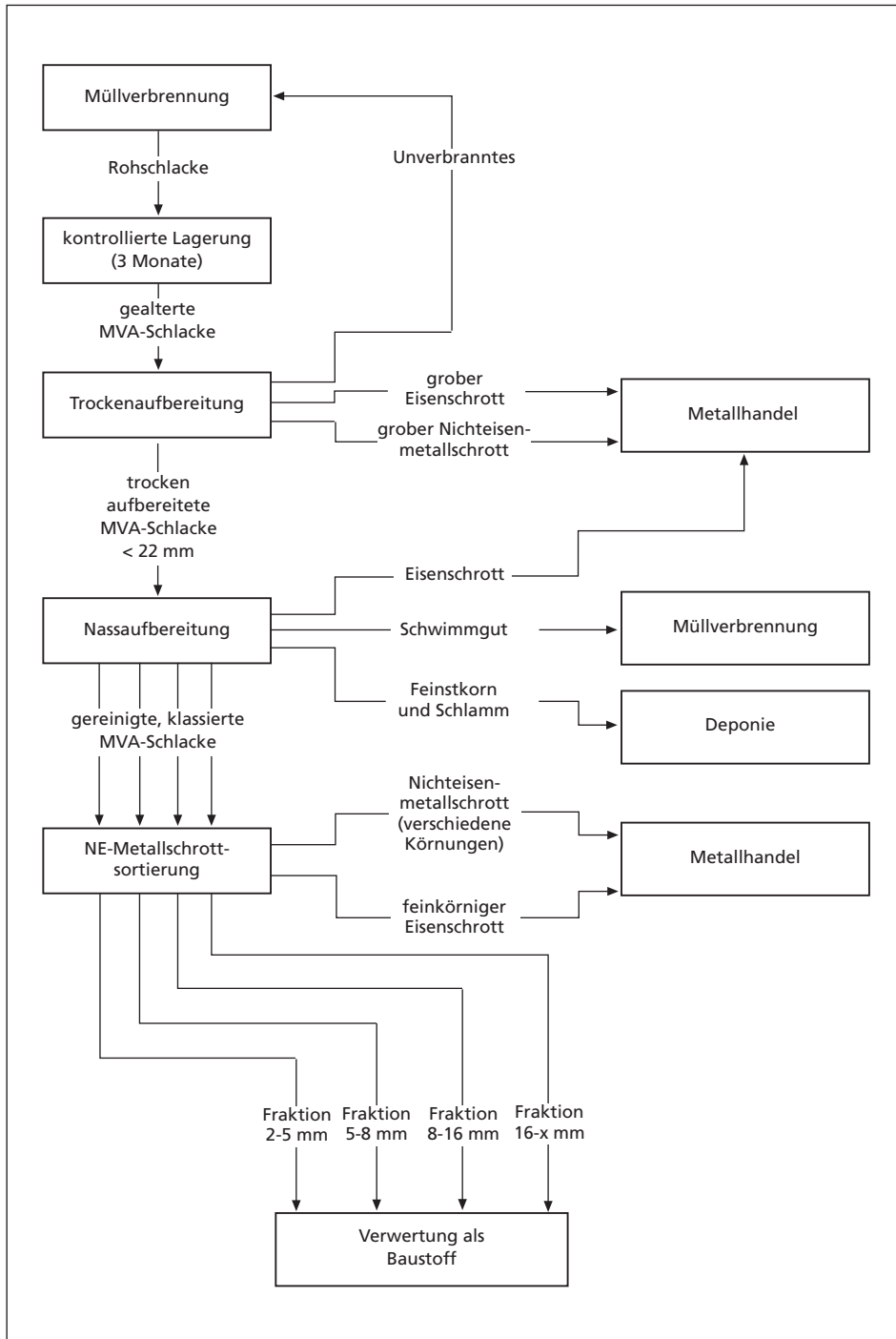


Bild 1: Verfahren zur weitergehenden Aufbereitung von Müllverbrennungsschlacke der Unternehmensgruppe Scherer + Kohl – Übersicht

## Verfahren der Scherer + Kohl GmbH zur weitergehenden Schlackeaufbereitung

Im nächsten Verfahrensschritt wird die Müllverbrennungsschlacke kleiner 22 mm durch Magnetscheidung und nassmechanische Verfahren nach feinkörnigem Eisenschrott und schwimmfähigem Unverbranntem sortiert und in definierte Fraktionen klassiert. In einer abschließenden Verfahrensstufe werden durch Wirbelstromscheidung aus den einzelnen Fraktionen die darin noch verbliebenen NE-Metalle aussortiert.

### Kap. 2.2.

## Schlackenalterung und trockene Aufbereitung

Bild 2 zeigt schematisch die Zwischenlagerung und die sich anschließende trockene Voraufbereitung der Müllverbrennungsschlacke.

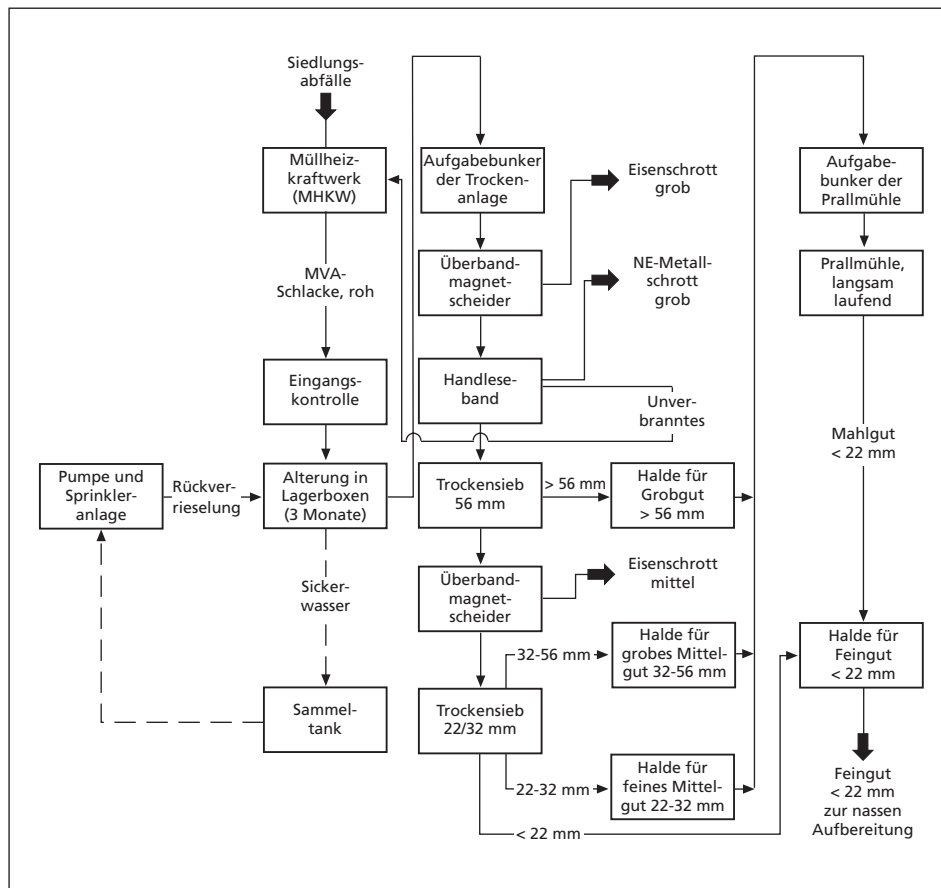


Bild 2: Alterung und trockene Aufbereitung von Müllverbrennungsschlacke nach dem Verfahren der Unternehmensgruppe Scherer + Kohl

Nach Verwiegung und Eingangskontrolle wird die frische Rohschlacke in nach oben offenen Lagerboxen für einen Zeitraum von mindestens drei Monaten zwischengelagert. Das Nutzvolumen der einzelnen Boxen ist so bemessen, dass dort die gesamte von einem Müllheizkraftwerk innerhalb eines Monats angelieferte Schlackemenge gelagert werden kann. Die Oberfläche der Schlackenmieten wird mit Sprinkleranlagen kontinuierlich angefeuchtet, damit zum einen keine Staubverwehungen stattfinden können und zum anderen in den Mieten ausreichend Feuchtigkeit vorhanden ist, um die dort ablaufenden Alterungsprozesse zu beschleunigen.

Der Boden der Lagerboxen ist betoniert und weist ein geringes Gefälle zu einer vorgelagerten, offenen Sammelrinne auf. Nicht verdunstetes Beregnungswasser wird darin gesammelt und zu unterirdischen Zisternen geleitet. Von dort aus wird das Sickerwasser mit Pumpen zur Befeuchtung der Mieten erneut aufgegeben.

Die Erfahrungen der letzten fünf Jahre haben gezeigt, dass zu keinem Zeitpunkt eine Entsorgung des in den Zisternen gesammelten Wasser erforderlich war. Stattdessen muss die zur Beregnung benötigte Wassermenge, insbesondere in den Sommermonaten, regelmäßig durch Frischwasser ergänzt werden.

Die gealterte Müllverbrennungsschlacke wird im Verlauf der trockenen Aufbereitung zunächst nach grobem Eisenschrott und grobem Unverbranntem sowie grobem NE-Metallschrott sortiert. Anschließend wird der Gutstrom zunächst bei 56 mm und anschließend auf einem zweistufigen Sieb bei 22 und 32 mm gesiebt. Zwischen beiden Siebstufen findet eine erneute Magnetscheidung statt. Die drei Kornklassen größer 22 mm werden nun mit einer Prallmühle auf kleiner 22 mm zerkleinert. Die Prallmühle wird so betrieben, dass sie möglichst wenig Feinkorn erzeugt und damit durch Sinterung verbackene Agglomerate kornschonend aufgelöst werden.

### *Kap. 2.3.*

## **Nasse Verfahrensstufe**

Im Verlauf der trockenen Schlackenaufbereitung wurde das gesamte Eingangsmaterial auf kleiner 22 mm zerkleinert und grobe Störstoffe aussortiert. Bei den sich anschließenden nassen Verfahrensstufen wird nach einer erneuten Magnetscheidung der Materialstrom auf einem Schwingsieb unter starker Bebrausung mit Wasser bei 2 mm abgeseibt.

Die hierbei erzeugten Kornklassen werden dann in einem Hydrobandabscheider von schwimmfähigen Störstoffen befreit. Bild 3 zeigt schematisch einen Hydrobandabscheider. Er benutzt ein Transportband. Das zu reinigende Gut wird bereits mit Wasser versetzt entgegen der Bandlaufrichtung aufgegeben. Die Trennströmung wird durch Einstromdüsen erzeugt. Die Verunreinigungen werden durch die Trennströmung entfernt, das gereinigte Gut wird mit dem Band über eine höher liegende Antriebstrommel ausgetragen, wobei eine Entwässerung

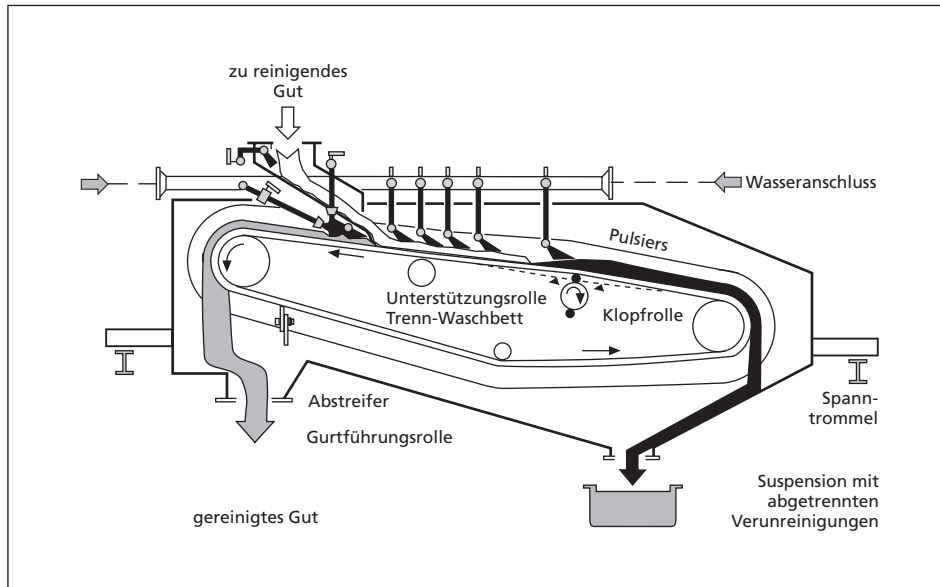


Bild 3: Hydrobandabscheider

stattfindet. Die mit dem Hydrobandabscheider sortierten Verunreinigungen werden dann entwässert und, da sie im Wesentlichen aus Unverbranntem bestehen, zur Verbrennungsanlage rückgeführt.

Die Schlacke kleiner 2 mm wird mit einem Sandabscheider in zwei Sandqualitäten getrennt und kann nach einer Entwässerung auf Spaltsieben als Sekundärbau-  
stoff, z.B. als Kabelsand, verwertet werden.

Die Schlacke der Korngröße 2 bis 22 mm wird in den nächsten Verfahrensschritten auf Schwingsieben in mehrere Fraktionen klassiert. Da im Aufgabegut ein geringer Anteil an Überkorn größer 22 mm enthalten ist, wird die zuletzt abgeseibte Kornklasse 16 bis x mm zur Prallmühle der Trockenaufbereitung rückgeführt.

Die nasse Verfahrensstufe ist in Bild 4 dargestellt.

#### *Kap. 2.4.*

### **NE-Metallschrottsortierung**

Nach der nassen Aufbereitung enthalten die einzelnen Kornklassen NE-Metalle, die, wie Untersuchungen zeigten, zu einer erhöhten Schwermetallbelastung der Schlackeprodukte führen können. Die einzelnen Fraktionen werden daher in einer abschließenden Verfahrensstufe über einen Wirbelstromscheider geführt.

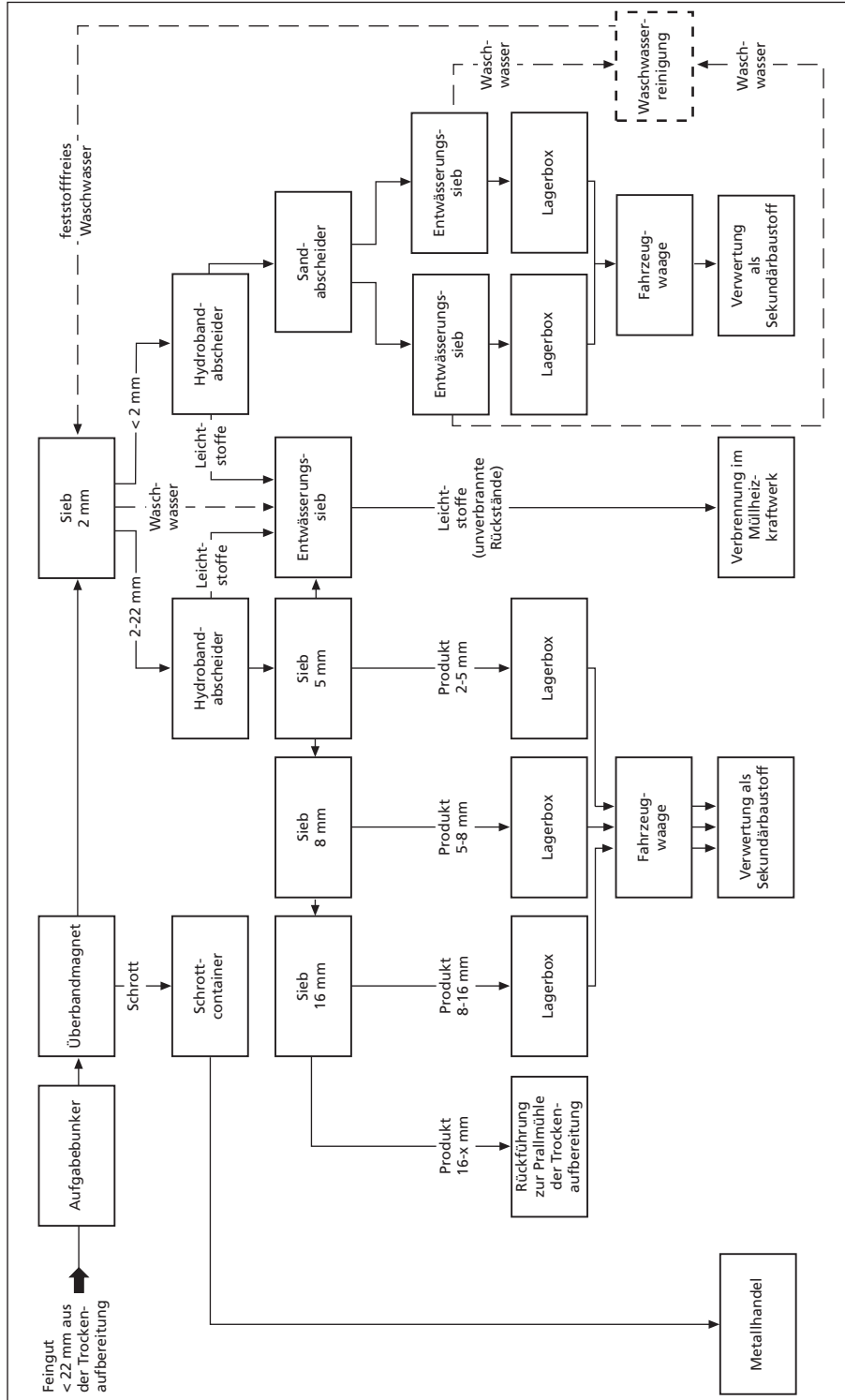


Bild 4: Nasse Aufbereitung von Müllverbrennungsschlacke nach dem Verfahren der Unternehmensgruppe Scherer + Kohl



## Verfahren der Scherer + Kohl GmbH zur weitergehenden Schlackeaufbereitung

Dieses auf dem Induktionsprinzip basierende Sortiergerät besteht in seinem Basis-Aufbau aus einer kurzen Bandstrecke, die aufgabeseitig angetrieben wird. In seiner Kopftrommel befindet sich ein schnell rotierendes Permanentmagnetsystem, ein Polsystem, das hochfrequente, magnetische Wechselfelder erzeugt. Diese induzieren starke elektrische Wirbelströme in den NE-Metalteilen, die nun ihrerseits eigene, dem äußeren Feld entgegenwirkende Magnetfelder aufbauen. Die NE-Teile werden entsprechend der Lenzschen Regel vom induzierenden Magnetfeld abgestoßen und aus dem übrigen Materialstrom abgelenkt. Das Bild 5 zeigt schematisch das Trennprinzip des Wirbelstromscheiders.

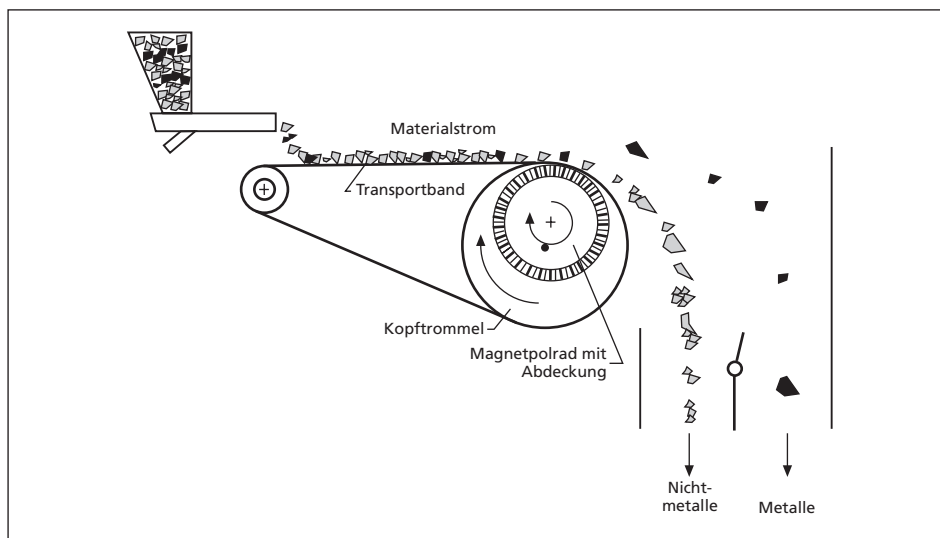


Bild 5: Trennprinzip des Wirbelstromscheiders

Quelle: Kellerwessel: Aufbereitung disperser Feststoffe. VDI Verlag, S. 129, bearbeitet

### Kap. 2.5.

## Massenbilanz und Qualität des Schlackeproduktes

In Bild 6 wird in vereinfachter Form die Massenbilanz der weitergehenden Aufbereitung von Müllverbrennungsschlacken gezeigt.

Die Umweltverträglichkeit von Schlackeprodukten wird insbesondere vor dem Hintergrund der LAGA-Regeln bewertet. In den Tabellen 4 und 5 werden daher die von der LAGA für die Verwertung von Müllverbrennungsschlacke und Bodenaushub aufgestellten Zuordnungswerte mit den Werten verglichen, die in

- roher Müllverbrennungsschlacke,
- drei Monate gelagerter Müllverbrennungsschlacke sowie
- weitergehend aufbereiteter Müllverbrennungsschlacke

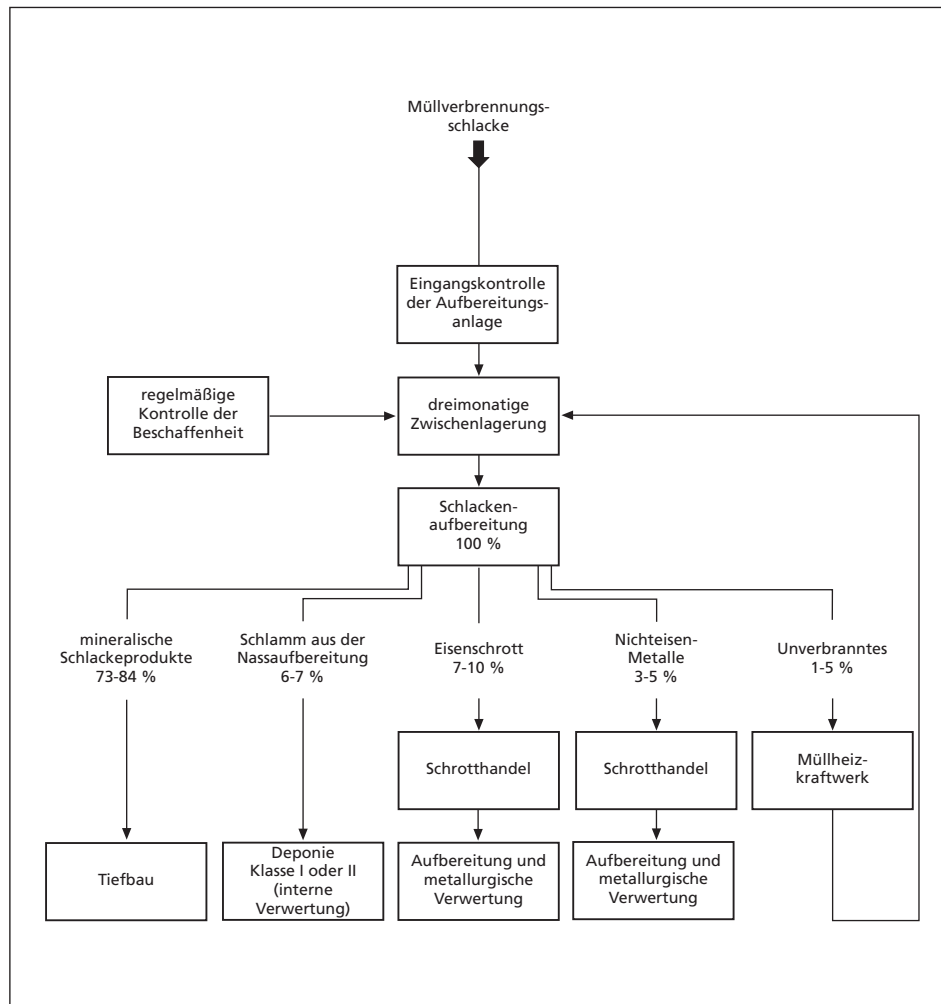


Bild 6: Massenbilanz der weitergehenden Schlackenaufbereitung nach dem Verfahren der Unternehmensgruppe Scherer + Kohl

analysiert wurden. Die untersuchte Schlacke stammte aus dem MKW Ludwigs-hafen. Tabelle 4 nennt Schwermetallkonzentration im Feststoff; Tabelle 5 ver-gleicht analog Eluatkonzentrationen.

Der Vergleich der Feststoffkonzentrationen zeigt, dass nach einer fachgerech-ten dreimonatigen Lagerung alle untersuchten Schwermetalle bereits unter den LAGA-Zuordnungswerten für Müllverbrennungsschlacken liegen. Diese Müllver-brennungsschlacke könnte bei ausschließlicher Berücksichtigung der Schwer-metallkonzentrationen bereits verwertet werden. Die Werte für Kupfer und Zink liegen jedoch noch deutlich über den Zuordnungswerten (Boden) Z 2.

## Verfahren der Scherer + Kohl GmbH zur weitergehenden Schlackeaufbereitung

Tabelle 4: Vergleich von Feststoffparametern von Schlacken mit LAGA-Richtwerten

Parameter	Einheit	frische Rohschlacke	gealterte Rohschlacke	weitergehend aufbereitete Schlacke	LAGA-Zuordnungswerte (Boden)				LAGA Schlacke
					Z 0	Z 1.1	Z 1.2	Z 2	
<b>Werte im Feststoff</b>									
Arsen	mg/kg	7,5	3,0	n.n.	20	30	50	150	–
Blei	mg/kg	2.900	1.000	190	100	200	300	1.000	6.000
Cadmium	mg/kg	9,2	2,5	0,8	0,6	1	3	10	20
Chrom (ges.)	mg/kg	86	110	67	50	100	200	600	2.000
Kupfer	mg/kg	860	710	150	40	100	200	600	7.000
Nickel	mg/kg	46	74	23	40	100	200	600	500
Quecksilber	mg/kg	n.n.	n.n.	n.n.	0,3	1	3	10	–
Thallium	mg/kg	n.n.	n.n.	n.n.	0,5	1	3	10	–
Zink	mg/kg	1.200	1.700	470	120	300	500	1.500	10.000

n.n. nicht nachweisbar

Tabelle 5: Vergleich von Eluatparametern von Schlacken mit LAGA-Richtwerten

Parameter	Einheit	frische Rohschlacke	gealterte Rohschlacke	weitergehend aufbereitete Schlacke	LAGA-Zuordnungswerte (Boden)				LAGA Schlacke
					Z 0	Z 1.1	Z 1.2	Z 2	
<b>Werte im Eluat</b>									
Chlorid	mg/l	220	120	29	10	10	20	30	250
Sulfat	mg/l	110	230	43	50	50	100	150	600
Cyanide (ges.)	µg/l	6	6	n.n.	< 10	10	50	100	20
Arsen	µg/l	n.n.	2,0	1,3	10	10	40	60	–
Blei	µg/l	510	n.n.	n.n.	20	40	100	200	50
Cadmium	µg/l	n.n.	n.n.	n.n.	2	2	5	10	5
Chrom (ges.)	µg/l	19	57	n.n.	15	30	75	150	200
Kupfer	µg/l	250	270	n.n.	50	50	150	300	300
Nickel	µg/l	n.n.	n.n.	n.n.	40	50	150	200	40
Quecksilber	µg/l	n.n.	n.n.	n.n.	0,2	0,2	1	2	1
Thallium	µg/l	n.n.	n.n.	2	< 1	1	3	5	–
Zink	µg/l	35	13	n.n.	100	100	300	600	300
Phenol-Index	µg/l	40	40	n.n.	< 10	10	50	100	–

n.n. nicht nachweisbar

Nach der weitergehenden Aufbereitung gemäß dem oben vorgestellten Verfahren liegen die Werte für Kupfer und Zink bei Z 1.2, alle weiteren Werte entsprechen der Einstufung Z 1.1 (Blei, Cadmium, Chrom) oder Z 0 (Arsen, Nickel, Quecksilber, Thallium).

Der analoge Vergleich der Eluatkonzentrationen zeigt, dass hier nach der weitergehenden Aufbereitung, abgesehen von Chlorid, alle Vorgabewerte für die uneingeschränkte Verwertung von Boden (Z 0) unterschritten werden. Der Wert für Chlorid entspricht Z 1.2 (Boden).

### *Kap. 3.*

## **Fazit**

Durch das von der Unternehmensgruppe Scherer + Kohl, Ludwigshafen, entwickelte Verfahren zur weitergehenden Aufbereitung von Müllverbrennungsschlacke ist es gelungen Schlackeprodukte zu erzeugen, die in fast allen Parametern den Anforderungen Z 1.1 (Boden) der LAGA entsprechen. Dieses Verfahren wird am Standort Ludwigshafen bereits seit mehreren Jahren erfolgreich im großtechnischen Maßstab betrieben und definiert damit den Stand der Technik in der Schlackenaufbereitung.

Aufsichtsbehörden, Abnehmer und LAGA sind daher aufgefordert, die Bedingungen für die Verwertung von Müllverbrennungsschlacke neu zu definieren und Vorbehalte gegenüber diesem in großen Mengen anfallenden Sekundärbaustoff zu überdenken.

### *Kap. 4.*

## **Literatur**

- [1] Bambauer, H. U.; Gebhard, G.; Holzapfel, Th.; Krause, Ch.; Willner, G.: Schadstoffimmobilisierung in Stabilisaten aus Braunkohleaschen und REA-Produkten, I.: Mineralreaktionen und Gefügeentwicklung; Chlorid-Fixierung. In: Fortschr. Miner. 66 (1988), S. 253-279
- [2] Bayerisches Landesamt für Umweltschutz, BayLfU: Verwertung von MV-Rostschlacke in Bauvorhaben, Abschlußbericht, 2002
- [3] Buijtenhek, H. S.; Zeeu, J. H.; Steketee, J. J.: Aufbereitung von MV-Schlacken durch Waschprozesse; IRC Berlin, 1989
- [4] Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe Sonderaufgaben: ZTVT-StB 95, Zusätzliche technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Trag-schichten im Straßenbau. FGSV Verlag, Köln, FGSV-Nr: 999, 1998
- [5] Göttlicher R.; Anton P.: Reststoffe aus Müllverbrennung. In: Abfallwirtschafts-Journal. (1990), Nr. 2

## Verfahren der Scherer + Kohl GmbH zur weitergehenden Schlackeaufbereitung

- [6] Julius, J.: Mechanische Schlackenaufbereitungstechniken und maschinelle Ausrüstung nach dem System KHD Humboldt Wedag AG. In: Beiheft 31 zu Müll und Abfall, S. 112
- [7] Kellerwessel: Aufbereitung disperser Feststoffe. VDI Verlag, S. 129
- [8] Kersten, M.: Emissionspotential einer Schlackenmonodeponie/Schwermetalle im Sickerwasser von Müllverbrennungsschlacken – ein langfristiges Umweltgefährdungspotential. In: Geowissenschaften 14 (1996), S. 180-185
- [9] Klein, R.; Speiser, C.; Baumann, T.; Niessner, R.: Exothermer Stoffumsatz in MVA-Schlackedeponien. Abschlussbericht, Lehrstuhl für Hydrochemie, Hydrogeologie und Umweltanalytik, TU München, 1999
- [10] 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. Initiativen zum Umweltschutz 13. Hrsg.: Deutsche Bundesstiftung Umwelt, Erich Schmidt Verlag, Berlin, 1999
- [11] König, T.: Untersuchungen zur Sortierung von Schlacken aus Hausmüllverbrennungsanlagen; Dissertation RWTH Aachen; Verlag Shaker, 1993
- [12] Krass, K.; Pitschak, S.: Stoffliche und bautechnische Charakterisierung von Wirbelschichtaschen für den Einsatz in hydraulisch gebundenen Schichten im Straßenbau. In: VGB Kraftwerkstechnik 77 (1997), S. 230-235 (Anm. Zahlenangaben ohne zwischengelagerte MVA-Schlacke)
- [13] LAGA: Mitteilungen der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall Nr. 20/1: Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Reststoffen/Abfällen – Technische Regeln vom 1. März 1994. Erich Schmidt Verlag, Berlin, 1994
- [14] Lahl, U.: Verwertung von MVA-Schlacken durch Optimierung konventioneller Aufbereitung, Teil II. In: Müll und Abfall 9 (1992), S. 619-633
- [15] Lichtensteiger, T.; Zeltner, C.: Petrographische Eigenschaften/Langzeitverhalten von MV-Schlacken; Emissionsabschätzung für Kehrichtschlacke (Projekt EKESA). Amt für Gewässerschutz und Wasserbau des Kt. Zürich, Zürich, 1992, S. 27-41 u. S. 94-102
- [16] Pfrang-Stotz, G.; Schneider, J.: Comparative studies of waste incineration bottom ashes from various grate and firing systems, conducted with respect to mineralogical and geochemical methods of examination. In: Waste Management & Research 13 (1995), S. 273-292
- [17] Pretz, Th.; Meier-Kortwig, J.: Aufbereitung von Müllschlacken unter besonderer Berücksichtigung der Metallrückgewinnung, 1998
- [18] Puch, K.-H.: Produkte aus der thermischen Abfallbehandlung – eine Beitrag zur Ressourcenschonung; Informationsveranstaltung Schlacke 05.06.2003, Technische Werke Ludwigshafen und GML Abfallwirtschaftsgesellschaft mbH
- [19] Reimann, O.: Verwertungsmöglichkeiten von Müllverbrennungsschlacke – Gesamtübersicht. In: Müll und Abfall 1992, Nr. 9
- [20] Schießl, P.; Müller, Ch.: Baustoffkreislauf im Massivbau (BiM); Bewertung der bei der Aufbereitung von Bauschutt anfallenden Recyclingzuschläge hinsichtlich der Eignung als Betonzuschlag; BiM-Projekt-Nr. D/03; Zwischenbericht 1997
- [21] Schneider, J.; Pfrang-Stotz, G.; Kössel, H.: Charakterisierung von MV-Schlacken. In: Beihefte zu Müll und Abfall 31 (1994), S. 38-43
- [22] Speiser, C.: Exothermer Stoffumsatz in MVA-Schlackedeponien: Mineralogische und Geochemische Charakterisierung von Müllverbrennungsschlacken, Stoff- und Wärmebilanz. Dissertation, Lehrstuhl für Hydrochemie, Hydrogeologie und Umweltanalytik, TU München, 2001

Die Deutsche Bibliothek – CIP-Einheitsaufnahme

**Optimierung der Abfallverbrennung 1**

Karl J. Thomé-Kozmiensky.

– Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2004

ISBN 3-935317-16-6

ISBN 3-935317-16-6 TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky

Copyright: Professor Dr.-Ing. habil. Dr. h. c. Karl J. Thomé-Kozmiensky

Alle Rechte vorbehalten

Verlag: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky • Neuruppin 2004

Redaktion und Lektorat: Professor Dr.-Ing. habil. Dr. h. c. Karl J. Thomé-Kozmiensky und Dipl.-Ing. Stephanie Thiel

Erfassung und Layout: Petra Dittmann, Martina Ringgenberg und Cordula Müller

Druck: Mediengruppe Universal Grafische Betriebe Manz und Mühlthaler GmbH, München

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürfen.

Sollte in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien, z. B. DIN, VDI, VDE, VGB Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden sein, so kann der Verlag keine Gewähr für Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen. Es empfiehlt sich, gegebenenfalls für die eigenen Arbeiten die vollständigen Vorschriften oder Richtlinien in der jeweils gültigen Fassung hinzuzuziehen.