



Forschungszentrum Karlsruhe
in der Helmholtz-Gemeinschaft

Wissenschaftliche Berichte
FZKA 7422

Entsorgung der Schlacke aus der thermischen Restabfallbehandlung

T. Meinfelder, U. Richers

**Institut für Technikfolgenabschätzung und
Systemanalyse**

Juli 2008

Forschungszentrum Karlsruhe

in der Helmholtz-Gemeinschaft

Wissenschaftliche Berichte

FZKA 7422

Entsorgung der Schlacke aus der thermischen Restabfallbehandlung

T. Meinfelder*, U. Richers

Institut für Technikfolgenabschätzung
und Systemanalyse

* Fachhochschule Jena, Fachbereich SciTec

Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe

2008

Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor

Forschungszentrum Karlsruhe GmbH
Postfach 3640, 76021 Karlsruhe

Mitglied der Hermann von Helmholtz-Gemeinschaft
Deutscher Forschungszentren (HGF)

ISSN 0947-8620

urn:nbn:de:0005-074220

Zusammenfassung

Entsorgung der Schlacke aus der thermischen Restabfallbehandlung

Die thermische Abfallbehandlung ist in Deutschland ein wichtiger Bestandteil der deutschen Entsorgungswirtschaft, der aufgrund der Entwicklungen bei der Energieversorgung und Klimadiskussion zukünftig an Bedeutung gewinnen wird. Im Rahmen der durchgeführten Arbeiten wird der aktuelle Sachstand zur Entsorgung der Schlacke zusammengefasst, die als Rückstand bei der Abfallverbrennung anfällt.

In einem ersten Arbeitsabschnitt werden die aktuellen Rechtsvorschriften im Hinblick auf die Entsorgung der Schlacken betrachtet. Berücksichtigt werden hier insbesondere die Vorschriften der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA). Auf bevorstehenden Änderungen durch eine neue Rechtsverordnung wird nicht eingegangen, denn zum Zeitpunkt der Durchführung der Arbeiten lagen hierzu keine belastbaren Informationen vor.

Ein weiterer Teil der Arbeit enthält Grundlagen über die thermische Abfallbehandlung, die möglichen Einflüsse auf die Schlackequalität und eine Übersicht über die Aufbereitungstechnologien, die in Abhängigkeit vom Verwertungsweg der Schlacken erforderlich sein können.

Als Grundlage für Aussagen zum Schlackeaufkommen aus der Abfallverbrennung und zur Schlackequalität werden verschiedene Datenquellen genutzt. Durch eine Fragenbogenaktion wurden Daten bei Betreibern großtechnischer Abfallverbrennungsanlagen erhoben. Außerdem standen Daten u. a. aus einer Literatursauswertung und einem umfangreichen Forschungsbericht zur Verfügung.

Die Auswertung ergibt für 2007 ein Schlackeaufkommen von 4,5 Mio. Tonnen für die insgesamt 72 Müllverbrennungsanlagen in Deutschland und einen durchschnittlichen spezifischen Schlackeanfall von 250 kg pro Tonne verbrannten Abfall.

Aus den zur Verfügung stehenden Informationen aus allen Datenquellen konnte ein Gesamtbild der Schlackequalität ermittelt werden. Die Beurteilung der Schlackequalität erfolgte in Bezug zu den derzeit gültigen Vorgaben. Diese Vorgaben, festgeschrieben in der Vorschriften der LAGA, werden für die Feststoffparameter bis auf wenige Ausnahmen von den Rohschlacken und den abgelagerten Schlacken unterschritten. In weiteren Vergleichen werden Zusammenhänge zwischen der Feuerungstechnik und dem Abfallinput einerseits und den Schlackeeigenschaften andererseits untersucht.

Aufgrund des unterschiedlichen Alters der verwendeten Datensätze ergibt sich, dass sich die Schadstoffgehalte im Feststoff und im Eluat von MV- Schlacken in den letzten Jahren nicht wesentlich verändert haben.

Abstract

Disposal of bottom ash arising from municipal solid waste incineration

In Germany, thermal waste treatment is a major part of waste management and will gain even more importance due to the developments in the energy supply sector and the climate discussion. This report is focussed on summarizing the current status of bottom ash disposal. Bottom ash is a residue of waste incineration.

In a first stage, current legislation with respect to the disposal of bottom ashes was analyzed. In particular, the regulations of the Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA, state association for waste treatment) were considered. Future modifications of the legislation were not dealt with, as no reliable information was available at the time this analysis was made.

The project also covered the fundamentals of thermal waste treatment, potential impacts on quality, and the processing technologies required as a function of the bottom ash recycling path.

Various data sources were applied to make statements with respect to the bottom ash volume produced by waste incineration and the bottom ash quality. Data were obtained from questionnaires sent to operators of technical waste incineration plants. In addition, data from a literature search and a comprehensive research report were available.

Evaluation of these data yielded a bottom ash volume of 4.5 million tons for all 72 waste incineration plants in Germany in 2007. The average specific bottom ash volume arising was 250 kg per ton incinerated waste.

Based on all data sources, bottom ash quality was compared and assessed with the currently valid regulations. With few exceptions, pollutant concentrations of raw and deposited bottom ashes were below the limits specified in the regulations of LAGA. Other comparisons were made to study the relationship between furnace technology and waste input, on the one hand, and bottom ash properties, on the other.

Taking into account the varying ages of the data sets used, it was found that the pollutant contents of waste incineration bottom ashes and their eluates did not change significantly in recent years.

Vorwort

Die vorliegende Arbeit beruht auf der Diplomarbeit, die Herr Meinfelder von der Fachhochschule Jena (Fachbereich SciTec) mit dem Titel "Entsorgung der Schlacke aus der thermischen Restabfallbehandlung" am Forschungszentrum Karlsruhe angefertigt hat.

Diese Diplomarbeit wurde überwiegend von Herrn Dr. Richers betreut. Für die vorliegende Publikation wurde der Text der Diplomarbeit von Herrn Dr. Richers überarbeitet.

Danksagung

Die Autoren danken Frau Dr. Prang-Stotz und Herrn Dr. Reichelt, die umfangreiche Daten aus einem Forschungsprojekt zur Verfügung gestellt haben.

Außerdem danken die Autoren Herrn Dr. Achternbosch und Herrn Hunsinger für die vielseitige Unterstützung im Zusammenhang mit der vorliegenden Arbeit..

Preface

The present report is based on a diploma thesis written by Mr. Meinfelder from the University of Applied Sciences of Jena (faculty SciTec) at the Forschungszentrum Karlsruhe. The thesis is entitled “Entsorgung der Schlacke aus der thermischen Restabfallbehandlung” (Disposal of the bottom ash arising from thermal waste treatment).

The diploma thesis was supervised mainly by Dr. Richers. For the present publication, the text of the diploma thesis was revised by Dr. Richers.

Acknowledgement

The authors would like to thank Dr. Prang-Stotz and Dr. Reichelt for making available comprehensive data from a research project.

The support of the project by Dr. Achternbosch und Mr. Hunsinger is gratefully acknowledged.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Problemstellung und Zielsetzung.....	2
3	Rechtliche Grundlagen	3
3.1	Immissionsschutzrecht	3
3.2	Bodenschutzrecht.....	4
3.3	Wasserrecht.....	5
3.4	Abfallrecht	6
3.5	Richtlinien der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA)	9
3.5.1	Mitteilung 19 der LAGA "Merkblatt zur Entsorgung von Abfällen aus Verbrennungsanlagen für Siedlungsabfälle"	9
3.5.2	Mitteilung 20 der LAGA "Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Abfällen"	10
3.6	Straßenbaurecht.....	15
4	Aktueller Stand bei der thermischen Abfallbehandlung.....	16
5	Stand der Aufbereitungstechnik von Schlacken	19
6	Wissensstand zur Charakterisierung von Schlacken.....	22
6.1	Makroskopische Zusammensetzung	23
6.2	Chemische Zusammensetzung	23
6.3	Mineralogische Eigenschaften	24
6.4	Einfluss des Abfallinputs auf die Eigenschaften von Schlacken.....	25
6.5	Einfluss der Feuerungstechnik auf die Beschaffenheit der Schlacke	27
6.6	Alterungsverhalten	29
6.7	Elutionsverhalten	31
6.8	Langzeitverhalten	32
7	Material und Methoden	33
7.1	Datenerhebungsmethoden.....	33
7.2	Auswertestrategien	35
8	Datenauswertung.....	36
8.1	Daten zum Schlackeaufkommen.....	36
8.2	Daten zur chemischen Zusammensetzung von Schlacke.....	38
8.2.1	Hauptbestandteile von Schlacken aus der Abfallverbrennung	38
8.2.2	Feststoffparameter nach LAGA	42
8.3	Elutionsverhalten	50
8.4	Einfluss der Müllqualität auf Schlacken aus der Abfallverbrennung	61
8.5	Einfluss der Feuerungstechnik auf die Schlacke.....	65
8.6	Schlacke – Aufbereitung und Kosten	68
9	Zusammenfassung.....	70
10	Literaturverzeichnis.....	73
11	Abkürzungsverzeichnis.....	81
Anhang	83

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Aufbau der LAGA- M20 [BERTRAM 2003]	11
Abbildung 2: Darstellung der Einbauklassen [LAGA M20 2004]	12
Abbildung 3: Entwicklung der Anzahl der MVA und ihre Gesamtkapazitäten in Deutschland	16
Abbildung 4: Längsschnitt durch das MHKW Mainz [MARTIN 2007a (angepasst)].....	17
Abbildung 5: Entschlacker der Fa. Martin GmbH [MARTIN 2007b (angepasst)]	18
Abbildung 6: Permanentüberbandmagnet der Fa. Steinert [KOHAUPT]	20
Abbildung 7: Schlackeaufbereitungsanlage am Standort Breisgau [FREMGEN 2004]	21
Abbildung 8: Verfahren zur weitergehenden Aufbereitung von Müllverbrennungsschlacke der Unternehmensgruppe Scherer + Kohl [LÜCK 2004].....	22
Abbildung 9: Zusammensetzung des Abfallinputs (Feuchtsubstanz), Summe aus Hausmüll, Sperrmüll und Gewerbeabfällen [DEHOUST 2002]	25
Abbildung 10: Schematische Darstellungen verschiedener Rostarten für Abfall- verbrennungsanlagen [KOZMIENSKY 1994]	27
Abbildung 11: Schematische Darstellungen für Feuerraumgeometrien von Abfall- verbrennungsanlagen [KOZMIENSKY 1994]	28
Abbildung 12: Verteilung der Antworten bei der Umfrage.....	33
Abbildung 13: Spezifisches Schlackeaufkommen der letzten 10 Jahre (Erläuterungen im Text)	37
Abbildung 14: Vergleich der Siedlungsabfallzusammensetzung 1985 [KOZMIENSKY 1994] und 1998 bis 2002 [WEIGAND 2005].....	38
Abbildung 15: Schwankungsbreiten für die Konzentrationen der Hauptkomponenten von Schlacken (Literaturrecherche).....	39
Abbildung 16: Vergleich der Minimal- und Maximalkonzentrationen der Hauptkompo- nenten in Schlacken für Grob- und Feinfraktion (Literaturrecherche).....	41
Abbildung 17: Schwankungsbreiten für den Glühverlust von Rohschlacken und gealterten Schlacken aus Umfrage, Literatur und von Pfrang-Stotz	43
Abbildung 18: Schwankungsbreiten des Arsengehaltes im Feststoff von Rohschlacken und gealterten Schlacken aus Umfrage, Literatur und von Pfrang-Stotz	44
Abbildung 19: Schwankungsbreiten des Bleigehaltes im Feststoff von Rohschlacken und gealterten Schlacken aus Umfrage, Literatur und von Pfrang-Stotz	44
Abbildung 20: Schwankungsbreiten des Cadmiumgehaltes im Feststoff von Rohschlacken und gealterten Schlacken aus Umfrage, Literatur und von Pfrang-Stotz	45
Abbildung 21: Schwankungsbreiten des Chromgehaltes im Feststoff von Rohschlacken und gealterten Schlacken aus Umfrage, Literatur und von Pfrang-Stotz	45
Abbildung 22: Schwankungsbreiten des Kupfergehaltes im Feststoff von Rohschlacken und gealterten Schlacken aus Umfrage, Literatur und von Pfrang-Stotz	46
Abbildung 23: Schwankungsbreiten des Nickelgehaltes im Feststoff von Rohschlacken und gealterten Schlacken aus Umfrage, Literatur und von Pfrang-Stotz	46

Abbildung 24: Schwankungsbreiten des Zinkgehaltes im Feststoff von Rohschlacken und gealterten Schlacken aus Umfrage, Literatur und von Pfrang-Stotz	47
Abbildung 25: Schwankungsbreiten des Feststoffparameters EOX in Rohschlacke und gealterter Schlacke aus Umfrage, Literatur und von Pfrang-Stotz	48
Abbildung 26: Schwankungsbreiten des Feststoffparameters TOC in Rohschlacken und gealterten Schlacken aus Umfrage, Literatur und von Pfrang-Stotz	49
Abbildung 27: Schwankungsbreiten des pH- Werts von Rohschlacken und gealterten Schlacken aus Umfrage, Literatur und mit Daten von Pfrang-Stotz	51
Abbildung 28: Schwankungsbreiten des Eluatparameters elektrische Leitfähigkeit von Rohschlacken und gealterten Schlacken aus Umfrage, Literatur und mit Daten von Pfrang-Stotz	52
Abbildung 29: Schwankungsbreiten des Chloridgehaltes im Eluat von Rohschlacken und gealterten Schlacken aus Umfrage, Literatur und mit Daten von Pfrang-Stotz	53
Abbildung 30: Schwankungsbreiten des Sulfatgehaltes im Eluat von Rohschlacken und gealterten Schlacken aus Umfrage, Literatur und mit Daten von Pfrang-Stotz	53
Abbildung 31: Schwankungsbreiten des Cyanidgehaltes im Eluat von Rohschlacken und gealterten Schlacken aus Umfrage, Literatur und mit Daten von Pfrang-Stotz	54
Abbildung 32: Schwankungsbreiten des Gehaltes gelöster organischer Kohlenstoffe (DOC) im Eluat von Rohschlacken und gealterten Schlacken aus Umfrage, Literatur und mit Daten von Pfrang-Stotz	55
Abbildung 33: Schwankungsbreiten des Arsengehaltes im Eluat von Rohschlacken und gealterten Schlacken aus Umfrage, Literatur und mit Daten von Pfrang-Stotz	56
Abbildung 34: Schwankungsbreiten des Bleigealtes im Eluat von Rohschlacken und gealterten Schlacken aus Umfrage, Literatur und mit Daten von Pfrang-Stotz	56
Abbildung 35: Schwankungsbreiten des Cadmiumgehaltes im Eluat von Rohschlacken und gealterten Schlacken aus Umfrage, Literatur und mit Daten von Pfrang-Stotz	57
Abbildung 36: Schwankungsbreiten des Chromgehaltes im Eluat von Rohschlacken und gealterten Schlacken aus Umfrage, Literatur und mit Daten von Pfrang-Stotz	58
Abbildung 37: Schwankungsbreiten des Kupfergehaltes im Eluat von Rohschlacken und gealterten Schlacken aus Umfrage, Literatur und mit Daten von Pfrang-Stotz	58
Abbildung 38: Schwankungsbreiten des Nickelgehaltes im Eluat von Rohschlacken und gealterten Schlacken aus Umfrage, Literatur und mit Daten von Pfrang-Stotz	59
Abbildung 39: Schwankungsbreiten des Quecksilbergehaltes im Eluat von Rohschlacken und gealterten Schlacken aus Umfrage, Literatur und mit Daten von Pfrang-Stotz	60

Abbildung 40: Schwankungsbreiten des Zinkgehaltes im Eluat von Rohschlacken und gealterten Schlacken aus Umfrage, Literatur und mit Daten von Pfrang-Stotz	60
Abbildung 41: Mittlere Abfallzusammensetzung der an der Umfrage beteiligten Abfallverbrennungsanlagen	62
Abbildung 42: Durchschnittliche Heizwerte der an der Umfrage beteiligten Anlagen und durchschnittlicher Heizwert aller Anlagen (rote Linie).....	63
Abbildung 43: Spez. Schlackeaufkommen in Abhängigkeit von Summe aus Hausmüllanteil und Gewerbemüllanteil (Daten aus eigener Umfrage)	64
Abbildung 44: Ausgewählte Eluat- und Feststoffparameter in Abhängigkeit von der Feuerraumgeometrie (nähere Erläuterung siehe Text)	67
Abbildung 45: Ausgewählte Eluat- und Feststoffparameter in Abhängigkeit von der Art des Rostsystems (nähere Erläuterung siehe Text).....	68

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Zuordnungskriterien für Deponien aus Anhang 1 der AbfAbIV.....	8
Tabelle 2: Anhang 6 der LAGA- M19: Untersuchungen im Feststoff für Rohschlacken[LAGA M19 1994]	10
Tabelle 3: Zuordnungswerte und Feststoffuntersuchungen für Schlacken [LAGA M20 1997]	13
Tabelle 4: Zuordnungswerte und Eluatuntersuchungen für Schlacken [LAGA M20 1997]	14
Tabelle 5: Chemische Zusammensetzung Schlacken - Zusammenfassung von Messergebnissen nach 1990 von Reimann [REIMANN 1996]	24
Tabelle 6: Abfalldurchsatz, Schlackeanfall und berechnetes spez. Schlackeaufkommen (Daten aus eigener Umfrage bei deutschen MVA)	37
Tabelle 7: Durchschnittliche Verfahrensparameter im Regelbetrieb (Eigene Umfrage) ..	66

1 Einleitung

Bis ins 19. Jahrhundert erfolgte ein weitgehend ungeordneter Umgang mit Fäkalien und Abfällen, begleitet von Entstehung und Verbreitung von Krankheiten wie Cholera und Typhus. Mit der Erkenntnis über die Zusammenhänge zwischen Sterblichkeit und Hygiene wurde u. a. nach neuen Wegen für eine Verbesserung der Abfallentsorgung gesucht [BILITEWSKI 1991] [HABECK 1985] [REIMANN 1992].

Einen Lösungsweg stellte die Verbrennung von Abfällen dar. Eine erste funktionstüchtige Abfallverbrennungsanlage wurde im Jahr 1876 in England (Manchester) gebaut. In Deutschland nahm 1895 in Hamburg die erste Müllverbrennungsanlage den Betrieb auf, und kurz darauf folgten weitere Anlagen an den Standorten Frankfurt, Kiel, Fürth, Altona oder Aachen [REIMANN 1992]. Der prinzipielle Aufbau der Feuerung war den Rostfeuerungen sehr ähnlich, die heute bei der Verbrennung von Hausmüll überwiegen. Allerdings wurden damals die Anlagen ohne aufwändige Abgasreinigung errichtet.

Ab diesem Zeitpunkt begann eine stetige Weiterentwicklung von thermischen Verfahren und Abgasreinigungstechnologien zur schadlosen Entsorgung von Abfällen, bei gleichzeitiger Nutzung des Energieinhaltes. Der erzeugte Dampf wurde zum Antrieb von Dampfmaschinen und zur Stromerzeugung eingesetzt.

Seit Beginn der 50er Jahre entwickelte sich aufgrund des rasant wachsenden Wohlstands in Deutschland ein stark wachsendes Abfallaufkommen von dem erhebliche Anteile durch Deponierung beseitigt wurden. Bis Anfang der 70er Jahre entstanden mehr als 50.000 wilde Deponien in Deutschland [REIMANN 1992]. Zu dieser Zeit hatte die Abfallverbrennung nur eine relativ geringe Bedeutung.

Wissenschaftliche Erkenntnisse, genauere Mess- und Analysenverfahren und die Sensibilisierung der Bevölkerung für Umweltprobleme sowie neue Technologien führten seit den 70er Jahren zur Verabschiedung einer Vielzahl von Rechtsvorschriften, um die Schäden an der Umwelt zu mindern oder Belastungen in Nahrungsmitteln zu reduzieren.

Anfang der 90er Jahre wurden Umweltschäden durch belastete Sickerwässer aus Deponien bekannt, die zur Ablagerung von Siedlungsabfällen genutzt wurden. Im Sinn einer zukünftigen Minderung der negativen Einflüsse von Deponien auf die Umwelt wurde in Deutschland 1993 die "Technische Anleitung zur Verwertung, Behandlung und sonstigen Entsorgung von Siedlungsabfällen" (TA Siedlungsabfall) eingeführt.

Zu den wesentlichen Forderungen dieser Verwaltungsvorschrift für die Ablagerung von Siedlungsabfällen gehörte die Beschränkung des organischen Kohlenstoffgehalts (TOC) auf 1 bzw. 3 Masse-% in Abhängigkeit von der Deponieklasse ab 1. Juni 2005. Nach dem damaligen Stand der Technik war diese Vorgabe nur durch eine thermische Behandlung der Abfälle zu erreichen.

Mit der 2001 verabschiedeten Abfallablagerungsverordnung (AbfAbIV) wurden die Anforderungen der TA Siedlungsabfall rechtsverbindlich konkretisiert. Neben der thermischen Behandlung sollte in dieser Verordnung die mechanisch biologische Abfallvorbehandlung (MBA) berücksichtigt werden. Die Anforderungen und Fristen für zu deponierende Abfälle (nicht aus MBA) blieben unverändert.

Vor dem Hintergrund der später aufkommenden Klimadiskussion mit Forderungen zur Emissionsminderung klimaschädlicher Gase wie Kohlendioxid oder Methan und der an Bedeutung gewinnenden Ressourcenknappheit wird erneut über die Abfallentsorgungswege einschließlich der MBA diskutiert.

Eine besondere Bedeutung kommt in diesem Zusammenhang dem Eckpunktepapier über die zukünftige Entsorgung von Siedlungsabfällen zu, das 1999 vom Bundesministerium für Umwelt formuliert wurde und als "Ziel 2020" bekannt geworden ist [HAHN 2004]. Im Mittelpunkt dieses Konzeptes steht folgende Forderung:

"Bis spätestens 2020 sollen die Behandlungstechniken so weiterentwickelt und ausgebaut werden, dass alle Siedlungsabfälle in Deutschland vollständig und umweltverträglich verwertet werden."
[VERBÜCHELN 2003]

Gemäß dieser Forderung soll bis zum Jahr 2020 die oberirdische Deponierung von Siedlungsabfällen weitgehend beendet werden. Die entsprechende Umsetzung erfordert zukünftig eine intensivere stoffliche oder energetische Verwertung der Abfälle einschließlich einer Weiterentwicklung der Behandlungsverfahren [Keßler 2006].

Aufgrund dieser Anforderungen ist davon auszugehen, dass die thermische Behandlung von Siedlungsabfällen in Deutschland zunehmen wird.

2 Problemstellung und Zielsetzung

Zum gegenwärtigen Zeitpunkt existieren in Deutschland ca. 70 großtechnische Abfallverbrennungsanlagen mit einer Verbrennungskapazität von etwa 17 Mio. Tonnen pro Jahr. Hierbei fallen mehr als 4 Mio. Tonnen feste Rückstände an. [EUWID 11 2007] Während die Rückstände aus der Rauchgasreinigung ungefähr eine Masse von 20 bis 80 kg pro Tonne verbrannten Abfall ausmachen, wird die Hauptrückstandsmenge von dem Verbrennungsrückstand - der Schlacke - gebildet. Sie fällt in der Größenordnung von etwa 200 bis 300 kg pro Tonne verbrannten Abfall an. [REIMANN 1992]

Im Rahmen der Umsetzung des Ziels 2020 wird über eine Erweiterung der deutschen Abfallverbrennungskapazitäten auf über 20 Mio. Tonnen pro Jahr diskutiert. Zusätzlich sind über 40 Sekundärbrennstoffkraftwerke für die Verbrennung von aufbereiteten Abfallfraktionen in der Planung.

Dieses zukünftige Szenario bewirkt eine weitere Erhöhung der anfallenden festen Rückstände, insbesondere der Schlackefraktion aus der thermischen Abfallbehandlung. Eine hochwertige stoffliche Verwertung dieser Rückstände entsprechend den Anforderungen des Ziels 2020 erfordert die Einhaltung definierter Qualitätsstandards.

Die Schlacke als mengenmäßig bedeutendster Rückstand kann zum Beispiel als Sekundärrohstoff in der Bauindustrie natürliche Rohstoffressourcen ersetzen. Entsprechende konkrete Qualitätsstandards sind in Merkblättern der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) definiert. Hierbei spielen u. a. die chemische Zusammensetzung und die Auslaugbarkeit von Schadstoffen bei Kontakt mit Wasser bedeutende Rollen.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird der aktuelle Stand der Schlackeentsorgung aus der Hausmüllverbrennung in Deutschland untersucht. Im Mittelpunkt steht ein Vergleich der heutigen Schlackequalität im Vergleich zu älteren Daten aus der Literatur. Neben der chemischen Zusammensetzung ist zusätzlich das Auslaugverhalten bei Kontakt mit Wasser zu berücksichtigen.

Außerdem soll der Frage nachgegangen werden, ob Einflüsse der eingesetzten Verbrennungstechnik auf die Schlackequalität nachweisbar sind. Ein weiteres Ziel der durchgeführten Arbeiten ist die Identifikation von Problemstellen und die Ableitung von weiterem F&E-Bedarf.

Entsprechend dieser Zielstellungen gliedert sich die Arbeit in die folgenden Punkte:

- Zusammenfassung der aktuellen rechtlichen Vorschriften für die Verwertung der festen Rückstände aus der Abfallverbrennung
- Erfassung der in Deutschland anfallenden Schlackemengen inklusive Ermittlung von deren chemischer Zusammensetzung und Auslaugverhalten von Schadstoffen,
- Vergleich der Daten aus der Literatur mit den im Rahmen einer eigenen Umfrage bei den Betreibern erhobenen Daten,
- Bestimmung von Einflussgrößen wie Feuerungstechnik und Abfallzusammensetzung auf die Schlackequalität,
- Betrachtung der aktuellen Aufbereitungsverfahren für Schlacken,
- Vergleich der aktuellen Schlackequalität mit den rechtlichen Anforderungen,
- Ermittlung der aktuellen Kosten für die Verwertung von Schlacken in Deutschland

3 Rechtliche Grundlagen

Für die Erörterung der Nutzungsmöglichkeiten von Schlacken aus der thermischen Abfallbehandlung müssen zunächst die aktuellen rechtlichen Rahmenbedingungen betrachtet werden. Zu berücksichtigen sind einerseits die Regelungen für den Betrieb großtechnischer Abfallbehandlungsanlagen und andererseits die Anforderungen an die unterschiedlichen Entsorgungswege der anfallenden Schlacken.

Die folgenden Ausführungen geben einen Einblick in die wichtigsten Vorschriften mit direkter Relevanz zum Thema dieser Arbeit. Die Betrachtung beschränkt sich auf das Bundesrecht, spezielle länderspezifische Regelungen werden nicht näher erläutert.

3.1 Immissionsschutzrecht

Im Mittelpunkt des deutschen Immissionsschutzrechts steht das "Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnlichen Vorgängen (Bundes-Immissionsschutzgesetz – BImSchG)" [BIMSCHG 2002].

Dieses Gesetz existiert seit 1974 und wurde seitdem mehrfach geändert und ergänzt. Zum Geltungsbereich gehören u. a. Betriebsstätten, verkehrstechnische Anlagen sowie Kraft- und Schienenfahrzeuge. Ist eine gewerbliche Anlage oder eine andere dem BImSchG unterliegende Einrichtung in besonderem Maße in der Lage schädliche Umwelteinwirkungen hervorzurufen, so werden diese als genehmigungspflichtige Anlagen eingestuft, d.h. sie bedürfen einer behördlichen Genehmigung.

Entsprechend dem BImSchG existieren für den Bau und den Betrieb von genehmigungsbedürftigen Anlagen besondere Anforderungen und Pflichten. Im Mittelpunkt steht hier § 5 BImSchG mit der allgemeinen Forderung, dass negative Auswirkungen auf die Umwelt im Anlagenbetrieb nicht entstehen können bzw. durch Maßnahmen nach dem Stand der Technik vermieden werden. Der § 5 Abs. 1 Nr. 3 enthält explizite Anforderungen in Bezug auf die Entstehung von Abfällen und dem anschließenden Umgang. Der Anlagenbetrieb soll auf eine Abfallvermeidung bzw. auf eine Verwertung anfallender Abfälle ausgerichtet werden. Für den Umgang wird mit § 5 Abs. 1 Nr. 3 auf die Vorschriften und Prinzipien des Abfallrechts (Abschnitt 3.4) verwiesen. Weiterhin wird in § 5 Abs. 1 Nr. 4 BImSchG ein sparsamer und effizienter Einsatz von Energie gefordert. Für diese Vorgaben enthält das BImSchG allerdings keine konkreten Anforderungen oder Grenzwerte.

Zur Konkretisierung der allgemeinen Anforderungen aus dem BImSchG wurden bis zum heutigen Stand über 30 Verordnungen von der Bundesregierung erlassen. In der 4. BImSchV [4. BIMSCHV 1997], der "Verordnung über genehmigungsbedürftige Anlagen", ist in einem listenförmigen Anhang festgelegt, welche Anlagen einer Genehmigung durch die zuständige Behörde bedürfen. Im Anhang unter Nr. 8 sind unterschiedlichen Anlagen zur Verwertung und Beseitigung von Abfällen oder sonstigen Stoffen aufgeführt.

Durch die "Verordnung über das Genehmigungsverfahren" (9. BImSchV) [9. BIMSCHV] werden die Anforderungen an die Durchführung des Genehmigungsverfahrens detailliert geregelt. In der "Störfall-Verordnung" (12. BImSchV) [12. BIMSCHV] sind Vorschriften für technische Anlagen enthalten, die in Bezug auf größere Brände, Schadstofffreisetzungen oder ähnliche Ereignisse zu beachten sind.

Weitere Verordnungen enthalten spezielle Vorschriften und Emissionsgrenzwerte für ausgewählte Anlagen. Zu diesen Verordnungen gehört u. a. die 17. BImSchV [17. BIMSCHV 2003], die "Verordnung über die Verbrennung und die Mitverbrennung von Abfällen".

Die in der 17. BImSchV konkretisierten Regelungen beziehen sich überwiegend auf die Emissionen, die mit dem gereinigten Rauchgas in die Atmosphäre abgegeben werden. Nur wenige Vorgaben in Form von Grenzwerten betreffen andere Bereiche der Abfallverbrennungsanlagen. In § 4 Abs. 1 der 17. BImSchV werden für die bei der Feuerung anfallende Schlacke ein TOC-Gehalt von unter 3 % oder ein Glühverlust von unter 5 %, jeweils bezogen auf die Trockenmasse, gefordert. Zusätzlich werden im § 4 Abs. 2 Mindesttemperaturen und dazu einzuhaltende Mindestverweilzeiten für das Rauchgas gefordert.

Für die Behandlung der bei der Verbrennung entstehenden Abfälle verweist § 7 Abs. 1 der 17. BImSchV auf den bereits angesprochenen § 5 Abs. 1 Nr. 3 BImSchG. Im § 7 Abs. 5 der 17. BImSchV werden ergänzend dazu Überwachungsanforderungen, hinsichtlich physikalischer und chemischer Eigenschaften sowie deren Gehalt an Schadstoffen, für die Entsorgung genannt. Besonderes Augenmerk soll auf die eluierbaren Stoffe und Schwermetalle gelegt werden. Die Ergebnisse der Analysen sollen über eine Verwertung oder eine Beseitigung entscheiden. Konkrete Grenzwerte werden in der 17. BImSchV nicht angegeben.

3.2 Bodenschutzrecht

Das Bodenschutzrecht wird in Deutschland seit 1999 durch das "Gesetz zum Schutz vor schädlichen Bodenveränderungen und zur Sanierung von Altlasten (BBodSchG) - Bundes-Bodenschutzgesetz" [BBODSCHG 1998] geregelt. Es soll gewährleisten, dass die natürliche Beschaffenheit und die Funktionen des Bodens gesichert bzw. bei Bedarf wiederhergestellt werden. Im Gesetz wurden erstmals Anforderungen zum Schutz des Bodens und der Umgang mit Verschmutzungen oder anderweitigen Schädigungen des Bodens geregelt.

Das Gesetz ist aus 5 Teilen aufgebaut, in denen neben dem Geltungsbereich und Begriffsbestimmungen die grundsätzlichen Pflichten in Bezug auf den Umgang mit Boden festgelegt sind. Weitere Teile des Gesetzes beziehen sich auf Altlasten und die landwirtschaftliche Nutzung von Böden. Das Anwendungsbereich vom BBodSchG berücksichtigt andere Rechtsvorschriften wie das Bundes-Immissionsschutzgesetz, Düngemittelrecht, Baurecht oder Abfallrecht.

In § 2 Abs. 1 BBodSchG wird Boden als obere Schicht der Erdkruste festgelegt, der die in § 2 Abs. 2 erwähnten Funktionen erfüllt. Zu den Funktionen die Filter-, Puffer- und Stoffumwandlungseigenschaften des Bodens und die Funktion als Archiv der natur- und Kulturgeschichte. Entsprechend § 2 Abs. 3 BBodSchG werden schädliche Bodenveränderungen als "Beeinträchtigungen der Bodenfunktionen" definiert, "die geeignet sind, Gefahren, erhebliche

Nachteile oder erhebliche Belästigungen für den einzelnen oder die Allgemeinheit" herbeizuführen [BBODSCHG 1998].

Um eine Sicherung der Bodeneigenschaften zu gewährleisten, besitzt nach § 7 BBodSchG jeder Grundstückseigentümer, und jeder der in irgendeiner Form auf einem Grundstück auf den Boden einwirkt, die Pflicht zur Vorsorge, dem Entstehen schädlicher Bodenveränderungen im Rahmen des Verhältnismäßigen durch entsprechende Maßnahmen vorzubeugen.

Das BBodSchG enthält für den Schutz des Bodens keine Grenzwerte oder ähnliche Vorgaben. Durch die § 6 und § 8 BBodSchG wurde die Bundesregierung ermächtigt, durch Rechtsverordnungen konkrete Anforderungen an das Ein- und Aufbringen von Materialien in und auf Böden sowie Beurteilungs- bzw. Grenzwerte festzulegen.

Die Festlegung konkreter Anforderungen wurde in der 1999 in Kraft getretenen "Bundesbodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV)" [BBODSCHV 1999] umgesetzt. Die Verordnung enthält Vorsorge-, Prüf- und Maßnahmewerte, die der Beurteilung des Entstehens und Umfangs schädlicher Bodenveränderungen sowie des Maßnahmenumfangs im Zusammenhang mit dem Bodenschutz dienen sollen.

Liegt der Verdacht einer schädlichen Bodenveränderung vor, so verlangt die BBodSchV neben der Beurteilung des Ausmaßes und des Maßnahmenumfangs anhand bestimmter Schadstoffgehalte, dass auch das Verunreinigungspotential dieser Verdachtsflächen für das Grundwasser abgeschätzt wird. Dazu wird in § 4 Abs. 3 BBodSchV eine sogenannte Sickerwasserprognose gefordert. Diese stellt eine Abschätzung der zu erwartenden Schadstoffeinträge über das Sickerwasser in das Grundwasser dar, die von einer schädlichen Bodenveränderung oder Altlast ausgehen kann. Als Ort der Beurteilung bezieht man sich dabei auf den Übergangsbereich von ungesättigter in wassergesättigte Zone. Die Schadstoffkonzentration, die im Sickerwasser im Bereich dieser Zone eingeschätzt wird, muss mit den Prüfwerten für den Wirkungspfad Boden - Grundwasser nach Anhang 2 Nr. 3 BBodSchV verglichen werden. Die Prüfwerte bilden somit die Schwelle zwischen unerheblich verändertem und schädlich verändertem Grundwasser. Man bezeichnet diese Konzentrationswerte deshalb auch als Geringfügigkeitsschwellen.

Folglich wurde mit dem Bodenschutzrecht erstmals eine Regelung zur Einschätzung der Gefahr einer vorhandenen Bodenveränderung für das Grundwasser gesetzlich festgeschrieben. Dieser Weg der Gefahrenbeurteilung ist auch bei der Verwertung von Abfällen im Zusammenhang mit Böden anwendbar. Um jedoch die Anforderungen der BBodSchV an diesen speziellen Fall einer Bodenveränderung entsprechend anzupassen wurde als Nachtrag zur BBodSchV von der Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) die „Grundsätze des Grundwasserschutzes bei Abfallverwertung und Produkteinsatz“ (GAP-Papier) [LAWA 2002] erarbeitet.

3.3 Wasserrecht

Die Berücksichtigung des Wasserrechts im Rahmen dieser Arbeit ergibt sich aus einer eventuellen Grund- oder Gewässerbelastung im Rahmen der Nutzung von Schlacken aus der Abfallverbrennung.

Die oberste rechtliche Grundlage zum Schutz von Gewässern in Deutschland bildet das "Gesetz zur Ordnung des Wasserhaushalts, (WHG) - Wasserhaushaltsgesetz" [WHG 2002] als Rahmengesetz in Verbindung mit den Wassergesetzen der Länder. Mit der Föderalismusreform wurde zwar die Rahmengesetzgebung abgeschafft, aber das Wasserhaushaltsgesetz gilt weiterhin. Aufgrund der neuen Regelungen dürfen die Länder zukünftig von den Regelungen des Bundes abweichen.

Das WHG gilt einerseits für das Meer und oberirdische Gewässer, wie Seen oder Flüsse. Andererseits wird vom Geltungsbereich auch das Grundwasser erfasst. Das Gesetz enthält allgemeine Vorschriften, die Verunreinigungen oder sonstige nachteilige Veränderungen von Gewässern verhindern und damit eine nachhaltige Sicherung der Gewässer als Bestandteil des Naturhaushaltes gewährleisten sollen. Die Vorschriften beziehen sich in der Regel auf ein Einleiten von Abwässern bzw. Schadstoffen in die entsprechenden zu schützenden Gewässer.

Die Vorschriften im vierten Teil des WHG zum Schutz des Grundwassers enthalten nur allgemein formulierte Anforderungen für die Einleitung von Wasser in das Grundwasser und dessen Bewirtschaftung. Beispielsweise ist ein Einleiten von Stoffen nur möglich, "wenn eine schädliche Verunreinigung des Grundwassers oder eine sonstige nachteilige Veränderung" vermieden werden. Eine Bewirtschaftung soll u. a. eine "nachteilige Veränderung seines mengenmäßigen und chemischen Zustands" vermeiden. Wann ein Schadstoffeintrag, z.B. durch die Entsorgung eines Abfalls, vorliegt, wird nicht konkretisiert.

Als Ergänzung zum WHG wurden von der Bundesregierung die Abwasserverordnung (AbwV) [ABWV 2004] und die Grundwasserverordnung (GrundwV) [GRUNDWV 1997] erlassen. Im Mittelpunkt der Abwasserverordnung stehen die Anhänge, die in Abhängigkeit von Herkunftsbereichen des einzuleitenden Abwassers bestimmte Mindestanforderungen vorschreiben. Die Grundwasserverordnung konkretisiert das WHG, in dem darin Schadstoffe festgelegt sind, die von der Einleitung ausgeschlossen werden können. In der Verordnung sind allerdings für diese Stoffe keine konkreten Grenzwerte angegeben.

Das deutsche Wasserrecht enthält auf Bundesebene somit keine konkreten Vorgaben, die bei den derzeitigen Entsorgungswegen für Schlacken aus der Abfallverbrennung berücksichtigt werden müssen. Entsprechend dem WHG muss bei der Entsorgung von Schlacken lediglich darauf geachtet werden, dass keine bedeutenden Schadstofffrachten z.B. durch den Boden in das Grundwasser eingetragen werden. Für detaillierte Anforderungen müssen ergänzend die länderspezifischen Anforderungen zum Gewässerschutz bzw. die Vorgaben der Städte und Kommunen beachtet werden.

3.4 Abfallrecht

Die aktuelle gesetzliche Grundlage für den Umgang mit Abfällen in Deutschland bildet seit 1996 das „Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Beseitigung von Abfällen, (Kreislaufwirtschafts-/ Abfallgesetz – KrW-/AbfG)“ [KRW-/ABFG 1994]. Es soll zum einen den Verbleib von Abfällen im Wirtschaftskreislauf zur Schonung der natürlichen Ressourcen fördern und zum anderen sicherstellen, dass Abfälle umweltverträglich beseitigt werden.

Das Gesetz ist aus neun Teilen aufgebaut, in denen grundsätzliche Anforderungen an Erzeuger, Besitzer und Entsorger von Abfällen gestellt werden sowie Vorschriften zur Förderung der Kreislaufwirtschaft festgelegt sind. Weiterhin enthält das KrW-/AbfG Regelungen zur innerbetrieblichen Abfallwirtschaft und Vorgaben zu Informations- und Kontrollpflichten.

Zu den wichtigsten Inhalten des Gesetzes gehört § 4 KrW-/AbfG, der eine Rangfolge für den Umgang mit Abfällen festlegt. Danach hat die Vermeidung von Abfällen Vorrang vor der Verwertung. Ist ein Abfall nicht zu vermeiden, muss die Möglichkeit der Verwertung geprüft werden. Besteht die Möglichkeit der Verwertung eines Abfalls, so fordert § 5 Abs. 3 KrW-/AbfG, dass diese ordnungsgemäß und schadlos erfolgen soll. Eine Verwertung muss ohne Beeinträchtigung des Wohles der Allgemeinheit erfolgen, insbesondere ohne Schadstoffanreicherung im Wertstoffkreislauf, sowie im Einklang mit anderen Rechtsvorschriften stehen.

Eine Beseitigung soll nur stattfinden, wenn eine Verwertung nicht möglich ist, oder wenn sich diese schädlicher auf die Umwelt auswirkt als eine Beseitigung (§ 5 Abs. 5 KrW-/AbfG). Zu dieser Abgrenzung und allen weiteren Anforderungen enthält das KrW-/AbfG allerdings keine konkretisierenden Erläuterungen oder Grenzwerte.

Das KrW-/AbfG wird durch insgesamt 21 Rechtsverordnungen ergänzt. Sie dienen in der Regel dazu, die Bestimmungen des KrW-/AbfG für bestimmte Entsorgungswege oder ausgewählte Abfälle zu konkretisieren.

Eine wichtige Verordnung in Bezug auf diese Arbeit ist die „Verordnung über das Europäische Abfallverzeichnis, AVV Abfallverzeichnis-Verordnung“ [AVV 2001] zu nennen. Sie dient der Umsetzung einer europaweit einheitlichen Bezeichnung von Abfällen und der Einstufung als gefährlich bzw. nicht gefährlicher Abfall, die maßgebend die Möglichkeiten der Abfallentsorgung bestimmt.

Die Schlacken aus Abfallverbrennungsanlagen werden entsprechend ihrer Herkunft dem Kapitel 19 der AVV zugeordnet, in dem "Abfälle aus Abfallbehandlungsanlagen, öffentlichen Abwasserbehandlungsanlagen sowie der Aufbereitung von Wasser für den menschlichen Gebrauch und Wasser für industrielle Zwecke" zusammengefasst sind. Eine genauere Zuordnung erfolgt bei "Abfälle aus der Verbrennung oder Pyrolyse von Abfällen" in der Untergeordneten Gruppe 19 01. Genau bezeichnet werden Schlacken durch die beiden folgenden Abfallschlüsselnummern:

- 19 01 11 Rost- und Kesselaschen sowie Schlacken,
die gefährliche Stoffe enthalten ("gefährlicher Abfall")
- 19 01 12 Rost- und Kesselaschen sowie Schlacken mit Ausnahme derjenigen,
die unter 19 01 11 fallen

Abfälle mit der Schlüsselnummer 19 01 11 stellen aufgrund ihrer Eigenschaften oder Inhaltsstoffe so genannte "gefährliche Abfälle" dar, so dass zusätzliche Auflagen bei Transport und Einschränkungen bei der Entsorgung bestehen.

Etwa zeitgleich zu der vorliegenden Arbeit wurde unter Leitung vom Interessengemeinschaft der thermischen Abfallbehandlungsanlagen in Deutschland (ITAD) und der Technischen Vereinigung der Großkraftwerksbetreiber e.V. (VGB) ein F&E- Projekt durchgeführt, in dem die Frage geklärt werden sollte, ob Schlacke als gefährlicher oder nichtgefährlicher Abfall einzustufen ist.

Erste Ergebnisse aus diesem Projekt wurden von Römke und Moser [RÖMKE 2007] publiziert. Eine ökotoxikologische Charakterisierung der Schlacken war problemlos durchführbar. Einige der untersuchten Schlacken zeigten deutliche ökotoxikologische Effekte, insbesondere nicht abgelagerte Schlacken. Eine gute Aufbereitung der Schlacken kann sich positiv auf die Umweltgefährlichkeit auswirken. Für weitere Details und Ergebnisse wird auf die Literatur [Becker 2007] [RÖMKE 2007] [NN 2008] verwiesen.

Im Rahmen der Entsorgung von Schlacken kommt auch eine Ablagerung auf Deponien in Betracht. Einerseits ist eine Beseitigung der Schlacke durch direkten Einbau in den Deponiekörper möglich, auf der anderen Seite kann eine Verwertung durch Profilierung der Deponie oder ähnliche Maßnahmen erfolgen. Für Deponien existieren auf der rechtlichen Basis des KrW-/AbfG drei Verordnungen:

- Verordnung über die umweltverträgliche Ablagerung von Siedlungsabfällen, AbfAbIV – Abfallablagerungsverordnung“ [ABFABLV 2001]
- Verordnung über Deponien und Langzeitlager, DepV – Deponieverordnung [DEPV 2002]
- Verordnung über die Verwertung von Abfällen auf Deponien über Tage, DepVerwV – Deponieverwertungsverordnung [DEPVERWV 2005]

Die AbfAbIV übernimmt maßgebliche Anforderungen an Abfälle, die auf Deponien beseitigt werden sollen, aus der TA Siedlungsabfall [TA SI 1991]. Ergänzend sind spezielle Forderungen für die Ablagerung von Rückständen aus der mechanisch biologischen Abfallbehandlung (MBA-Anlagen). Die Anforderungen der AbfAbIV sind bei Siedlungsabfällen in der Regel nur durch eine thermische oder mechanisch-biologische Vorbehandlung einzuhalten.

Für die Ablagerung von Abfällen, die nicht mechanisch-biologisch behandelt worden sind, unterscheidet die AbfAbIV zwischen der Deponieklasse I (DK I) und der Deponieklasse II (DK II). Für die Zuordnung von Abfällen zu DK I oder DK II sind die Zuordnungskriterien der Tabelle 1 einzuhalten.

Tabelle 1: Zuordnungskriterien für Deponien aus Anhang 1 der AbfAbIV

Nr.	Parameter	Zuordnungswerte	
		DK I	DK II
1	Festigkeit		
1.01	Flügelscherfestigkeit	≥ 25 kN/m ²	≥ 25 kN/m ²
1.02	Axiale Verformung	≤ 20 %	≤ 20 %
1.03	Einaxiale Druckfestigkeit	≥ 50 kN/m ²	≥ 50 kN/m ²
2	Organischer Anteil des Trockenrückstandes der Originalsubstanz		
2.01	bestimmt als Glühverlust	≤ 3 Masse %	≤ 5 Masse %
2.02	bestimmt als TOC	≤ 1 Masse %	≤ 3 Masse %
3	Extrahierbare lipophile Stoffe der Originalsubstanz ⁶	≤ 0,4 Masse %	≤ 0,8 Masse %
4	Eluatkriterien		
4.01	pH-Wert ⁷	5,5-13,0	5,5-13,0
4.02	Leitfähigkeit	≤ 10.000 µS/cm	≤ 50.000 µS/cm
4.03	DOC ⁸	≤ 50 mg/l ⁹	≤ 80 mg/l
4.04	Gesamtphenol	≤ 0,2 mg/l	≤ 50 mg/l
4.05	Arsen	≤ 0,2 mg/l	≤ 0,2 mg/l
4.06	Blei	≤ 0,2 mg/l	≤ 1 mg/l
4.07	Cadmium	≤ 0,05 mg/l	≤ 0,1 mg/l
4.08	Chrom (VI)	≤ 0,05 mg/l	≤ 0,1 mg/l
4.09	Kupfer	≤ 1 mg/l	≤ 5 mg/l
4.10	Nickel	≤ 0,2 mg/l	≤ 1 mg/l
4.11	Quecksilber	≤ 0,005 mg/l	≤ 0,02 mg/l
4.12	Zink	≤ 2 mg/l	≤ 5 mg/l
4.13	Fluorid	≤ 5 mg/l	≤ 15 mg/l ¹³
4.14	Ammoniumstickstoff	≤ 4 mg/l	≤ 200 mg/l
4.15	Cyanide, leicht freisetzbar	≤ 0,1 mg/l	≤ 0,5 mg/l
4.16	AOX	≤ 0,3 mg/l	≤ 1,5 mg/l
4.17	Wasserlöslicher Anteil (Abdampfrückstand) ¹⁴	≤ 3 Masse %	≤ 6 Masse %
4.18	Barium	≤ 5 mg/l	≤ 10 mg/l
4.19	Chrom, gesamt	≤ 0,3 mg/l	≤ 1 mg/l
4.20	Molybdän	≤ 0,3 mg/l	≤ 1 mg/l
4.21	Antimon	≤ 0,03 mg/l	≤ 0,07 mg/l
4.22	Selen	≤ 0,03 mg/l	≤ 0,05 mg/l
4.23	Chlorid	≤ 1 500 mg/l	≤ 1 500 mg/l
4.24	Sulfat	≤ 2 000 mg/l	≤ 2 000 mg/l

Für weitere Erläuterungen zu den Zuordnungswerten, Messverfahren, Ausnahmen usw. wird auf die AbfAbIV verwiesen.

Weitere Deponieklassen werden in der Deponieverordnung (DepV) definiert. Die Deponieklasse 0 (DK 0) für Inertabfälle, die Deponieklasse III (DK III), für Abfälle mit höheren Schadstoffgehalten als bei Abfällen, die auf DK II abgelagert werden dürfen, und die Deponieklasse IV (DK IV), für Abfälle, die in einer Untertagedeponie beseitigt werden. Die Liste der Parameter für die Zuordnung entspricht weitgehend Tabelle 1, für die Zuordnungswerte wird auf die Anhänge der DepV verwiesen.

Zusätzlich zur AbfAbIV und zur DepV wurde die Deponieverwertungsverordnung (DepVerwV)“ [DEPVERWV 2005] eingeführt, die eine Verwertung auf Deponien regelt. Durch diese Verordnung werden die unterschiedlichen Erlasse in den einzelnen Bundesländern durch eine bundeseinheitliche Vorschrift ersetzt, insbesondere die bisherige Berücksichtigung des LAGA-Merkblatts M20 (Siehe Abschnitt 3.5.2) ist nicht mehr möglich. [Zühlsdorf 2005].

Die DepVerwV schreibt vor, dass Abfälle nur dann auf Deponien zur Verwertung eingesetzt werden dürfen, wenn es dafür eine bautechnische Notwendigkeit (z.B. Profilierung des Deponiekörpers) gibt. Außerdem wird zwischen einer direkten Verwertung von Abfällen als Deponieersatzbaustoff und einer Herstellung von einem Deponieersatzbaustoff (Mischung) unterschieden.

Für eine Verwertung müssen von den Abfällen Zuordnungswerte eingehalten werden, die in den Anhängen I und II aufgeführt sind. Diese Zuordnungswerte hängen von der Klasse der Deponie ab, wo die Abfälle verwertet werden sollen. Außerdem ist der Einsatzzweck entscheidend; beispielsweise gelten für den Einbau in eine mineralische Dichtungsschicht andere Vorschriften als für die Entwässerungsschicht in der Oberflächenabdichtung.

3.5 Richtlinien der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA)

Die Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) ist ein Fach- bzw. Arbeitsgremium, das im Auftrag der Umweltministerkonferenz (UMK) handelt. Sie wurde am 2. Juli 1963 mit dem Ziel gegründet, einen ländereinheitlichen Vollzug des Abfallrechts in der Bundesrepublik Deutschland sicherzustellen. Dazu fördert die LAGA den Austausch von Informationen und Erfahrungen zwischen Bund und Ländern und entwickelt Vorschläge oder Anregungen zur Lösung abfallwirtschaftlicher Aufgabenstellungen, welche in Form von Merkblättern, Richtlinien und Informationsschriften als nummerierte Mitteilungen veröffentlicht werden. In den folgenden Abschnitten werden relevante Regelungen dargestellt.

3.5.1 Mitteilung 19 der LAGA "Merkblatt zur Entsorgung von Abfällen aus Verbrennungsanlagen für Siedlungsabfälle"

Das "Merkblatt zur Entsorgung von Abfällen aus Verbrennungsanlagen für Siedlungsabfälle" (LAGA M19) [LAGA M19 1994] wurde im März 1994 von der LAGA als Mitteilung 19 veröffentlicht. Es dient der bundeseinheitlichen Regelung der Entsorgung von Abfällen, die in thermischen Abfallbehandlungsanlagen anfallen, und wendet sich an Erzeuger, Aufbereiter und Verwerter. In der LAGA-M19 sind Untersuchungs-, Verwertungs- und Beseitigungsanforderungen für Schlacken, Filterstäube und Reaktionsprodukte aus der Abgasreinigung festgelegt. Diese stützen sich auf das Abfallgesetz von 1986 und die TA Siedlungsabfall [TA SI 1991].

Für das Abfallprodukt Schlacke werden spezielle Vorgaben und technische Maßnahmen genannt, die im Vorfeld einer Verwertung zu beachten sind bzw. diese erst möglich machen. Dazu gehören vor allem die Aufbereitungstechniken. Im Anhang 6 des Merkblatts M19 stehen Vergleichswerte für die Untersuchung von Schadstoffparametern im Feststoff der Rohschlacke, der Schlacke am Ende des Verbrennungsrostes nach dem Nassentschlacker oder einem anderen Austragsystem. Anhand dieser in Tabelle 2 dargestellten Werte muss

nachgewiesen werden, ob die Schlacke nach der Aufbereitung für eine Verwertung überhaupt geeignet ist. Für die Verwertung selbst werden die gleichen Anforderungen genannt, die auch in der Mitteilung 20 "Anforderungen an die stoffliche Verwertung mineralischer Abfälle" stehen. Da sie dort ausführlicher erklärt sind, werden die Anforderungen erst im folgenden Abschnitt 3.5.2 näher erläutert.

Tabelle 2: Anhang 6 der LAGA- M19: Untersuchungen im Feststoff für Rohschlacken [LAGA M19 1994]

Parameter	Dimension	Vorgabe
Aussehen	-	- ²
Farbe	-	- ²
Geruch	-	- ²
EOX	mg/kg	3
PAK4	mg/kg	- ²
PCDD/PCDF ³	ng I-TE/kg	0,6-30
Arsen ⁴	mg/kg	- ²
Blei	mg/kg	6000
Cadmium	mg/kg	20
Chrom	mg/kg	2000
Kupfer	mg/kg	7000
Nickel	mg/kg	500
Quecksilber ⁴	mg/kg	- ²
Zink	mg/kg	10000
Trockenrückstand	Masse- %	- ²
Glühverlust	Masse- %	<3
Zur näheren Erläuterung der Hinweise 1 – 4 siehe Anhang 6 der LAGA M19 [LAGA M19 1994]		

3.5.2 Mitteilung 20 der LAGA "Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Abfällen"

Die Mitteilung 20 der LAGA "Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Abfällen" wurde durch eine von der LAGA einberufenen Bund-/Ländergruppe, der LAGA AG "Mineralische Abfälle", erarbeitet und ebenfalls im März 1994 veröffentlicht. Nach einer Ergänzung durch die Technische Regel "Kraftwerksabfälle" übernahmen die Bundesländer das Regelwerk mit dem Stand 1997 in den Vollzug [LAGA M20 1998].

In dem Regelwerk sind übergreifende Verwertungsgrundsätze und konkrete Verwertungsanforderungen für die Verwertung von mineralischen Abfällen unter Berücksichtigung der Nutzung und der Standortverhältnisse festgelegt. Die Verwertung bezieht sich dabei im weitesten Sinne auf Baumaßnahmen z.B. im Erd-, Straßen- und Landschaftsbau. Der Aufbau des Regelwerkes besteht, wie in Abbildung 1 dargestellt, aus drei Teilen.

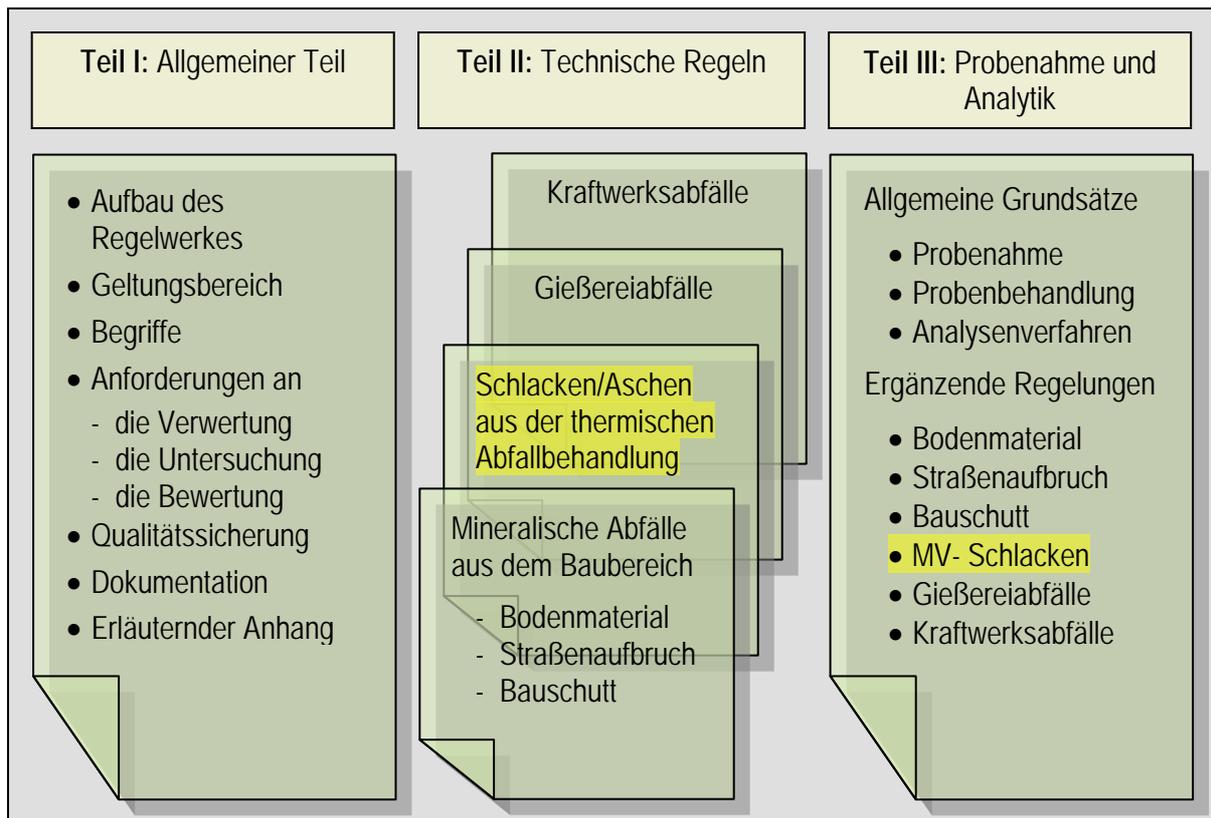


Abbildung 1: Aufbau der LAGA- M20 [BERTRAM 2003]

Auf Grund neuer rechtlicher Rahmenbedingungen gab es bis 2004 teilweise Erneuerungen der LAGA-M20. Darauf wird am Ende dieses Abschnitts noch einmal näher eingegangen. Die folgenden Beschreibungen der LAGA- M20 beziehen sich auf die letzte öffentlich zugängliche 5. Auflage, in dem die aktuellsten Überarbeitungen mit Stand November 2004 enthalten sind [LAGA M20 2004].

Teil I: Allgemeiner Teil

Im Teil I werden die übergreifenden Grundsätze und die allgemein gültigen Rahmenbedingungen beschrieben, die für die schadlose Verwertung von mineralischen Abfällen zu beachten sind. Hier findet man Festlegungen zum Geltungsbereich, Begriffsdefinitionen und allgemeine Anforderungen an die Verwertung, Untersuchung und Bewertung mineralischer Abfälle sowie die Regelung der Qualitätssicherung und Dokumentation. Ergänzend dazu gibt es einen erläuternden Anhang, in dem Angaben zur Zielstellung und den rechtlichen Rahmenbedingungen der LAGA-M20 gemacht werden.

Zu den wesentlichen Inhalten in diesem Teil des Regelwerkes gehört die Erläuterung des Bewertungskonzepts zur Beurteilung der Schadlosigkeit einer Verwertung mineralischer Abfälle. Dabei unterscheidet man drei Einbauklassen, die entsprechend der Herkunft, Beschaffenheit und Verwendungsart des Abfalls in Abhängigkeit von den jeweiligen Standortverhältnissen eingeteilt sind. Die möglichen Verwertungswege und ergänzend die Möglichkeiten zur Beseitigung (Ablagerung auf Deponien) sind in der Abbildung 2 dargestellt.

Zuordnungswerte (Obergrenze der Einbauklasse)					
→ Z0		→ Z1		→ Z2	
→ Z3		→ Z4		→ Z5	
Verwertung			Ablagerung in Deponien		
Einbau- klasse 0	Einbau- klasse 1	Einbau- klasse 2	Deponie- klasse I	Deponie- klasse II	Deponie- klasse III
Uneingeschränkter Einbau ¹⁾	Eingeschränkter offener Einbau	Eingeschränkter Einbau mit definierten Technischen Sicherungsmaßnahmen	(AbfAbIV/ DepV)	(AbfAbIV/ DepV)	(DepV)
1) Diese Einbauklasse gilt nur für die Verwertung in bodenähnlichen Anwendungen					

Abbildung 2: Darstellung der Einbauklassen [LAGA M20 2004]

Diese Einbauklassen sind durch differenzierte technische Anforderungen bzw. Rahmenbedingungen gekennzeichnet und werden durch entsprechende Zuordnungswerte begrenzt. Zuordnungswerte existieren für die Schadstoffkonzentrationen im Abfall (Feststoffwerte) und im Eluat. Die Schadstoffkonzentrationen im Eluat werden durch genormte Tests ermittelt, in denen der Feststoff über einen festgelegten Zeitraum mit Wasser in Kontakt gebracht wird. Nach der Abtrennung des Feststoffs werden die Schadstoffkonzentrationen in der wässrigen Phase, d.h. die in Lösung gegangenen Anteile, bestimmt.

Wie aus Abbildung 2 zu entnehmen ist, stellen die Zuordnungswerte die Obergrenze der Schadstoffparameter für die Verwertung in der entsprechenden Einbauklasse dar. Unterschreiten die gemessenen Konzentrationen im Abfall die Zuordnungswerte Z0, ist ein uneingeschränkter Einbau möglich. Der uneingeschränkte Einbau erfasst auch die Verwertung außerhalb technischer Bauwerke (Landschaftsbau). Werden die Zuordnungswerte Z1 unterschritten, ist die Verwertung in Einbauklasse 1 möglich, dem eingeschränkten offenen Einbau, d.h. die Verwertung kann in einem technischen Bauwerk in wasserdurchlässiger Weise erfolgen. Die Zuordnungswerte Z2 stellen die Obergrenze der Einbauklasse 2 dar, dem eingeschränkten Einbau mit definierten Sicherungsmaßnahmen. Mineralische Abfälle, die auf Grund ihrer Schadstoffkonzentrationen in diese Einbauklasse fallen, dürfen nur in einer nicht oder nur wenig wasserdurchlässigen Bauweise in technischen Bauwerken verwertet werden.

Eine Verwertung mineralischer Abfälle ist also laut LAGA-M20 möglich, so lange die Zuordnungswerte Z2 von den untersuchten Schadstoffparametern eingehalten werden. Bei einer Überschreitung der Z2-Werte sollte eine Beseitigung in die entsprechende Deponieklasse nach Abfallablagereungsverordnung (AbfAbIV) und Deponieverordnung (DepV) erfolgen.

Teil II: Technische Regeln

Der Teil II enthält konkrete Festlegungen für die Untersuchung und Bewertung der jeweiligen Abfälle sowie ergänzende Vorgaben für den Einbau. In den Technischen Regeln sind die abfallspezifischen Zuordnungswerte festgelegt, die unter Berücksichtigung der jeweiligen Einbaubedingungen eine schadlose Verwertung sicherstellen sollen. Diese Werte stellen keine festen Grenzwerte dar; es handelt sich um Vorsorgewerte aus Sicht des Boden- und Gewässerschutzes. Im Einzelfall können Abfälle auch dann eingebaut werden, wenn die Zuordnungswerte überschritten wurden. Allerdings muss der Nachweis erbracht werden, dass keine Beeinträchtigung des Wohles der Allgemeinheit besteht.

Die Technischen Regeln wurden für folgende mineralische Abfallarten erstellt: Bodenmaterial, Bauschutt, Straßenaufbruch, Gießereiabfälle, Schlacken aus Abfallverbrennungsanlagen und für Rückstände aus kohlebefeuerter Kraftwerken. Im Rahmen des folgenden Textes wird nur auf die für die vorliegende Arbeit relevanten Vorgaben für die Verwertung von Schlacken aus thermischen Abfallbehandlungsanlagen eingegangen.

In den Technischen Regeln "Schlacken und Aschen aus thermischen Abfallbehandlungsanlagen" sind sowohl Untersuchungs- als auch Verwertungsanforderungen festgelegt. Um Schlacke einer Verwertung zuzuführen sind im Vorfeld bestimmte Anforderungen an die Schlacke zu beachten. Zum einen wird vorgegeben, dass die Rohschlacken eine bestimmte Zeit gelagert und im Anschluss aufbereitet werden, zum anderen muss festgestellt werden, ob sie für eine Verwertung geeignet sind. Des Weiteren soll eine ständig gleich bleibende Qualität der verwertbaren Schlacken gewährleistet werden. Aus diesem Grund wird für die als verwertbar eingestuften Schlacken sowohl eine Eigenkontrolle als auch eine Fremdüberwachung gefordert.

Ist eine aufbereitete Schlacke als verwertbar befunden worden, kommt derzeit lediglich eine Verwertung in Einbauklasse 2 in Frage. Die in Tabelle 3 und Tabelle 4 dargestellten Zuordnungswerte Z2 sollten von den analysierten Schadstoffwerten in der Schlacke nicht überschritten werden.

Tabelle 3: Zuordnungswerte und Feststoffuntersuchungen für Schlacken [LAGA M20 1997]

Parameter	Dimension	Zuordnungswert	Eignungsfeststellung	Fremdüberwachung	Eigenkontrolle
Aussehen			+	+	+
Farbe		- ¹⁾	+	+	+
Geruch		- ¹⁾	+	+	+
Trockenrückstand	Masse- %	- ¹⁾	+	+	+
Glühverlust	Masse- %	- ¹⁾	+	+	+
TOC	Masse- %	1 ²⁾	+	+	
EOX	mg/kg	3	+	+	
1) ist anzugeben 2) für Altanlagen gilt 3 Masse-%					

Entsprechend den Technischen Regeln aus der LAGA-M20 sind für den Einbau in Einbauklasse 2 kontrollierte Großbaumaßnahmen zu bevorzugen, und beim Flächeneinbau soll darauf geachtet werden, dass in der Nutzungszeit des technischen Bauwerks nicht mit häufigen Aufbrüchen zu rechnen ist.

Für Schlacken aus der Abfallverbrennung kommt zum einen eine Verwertung als Tragschicht unter einer wasserundurchlässigen Deckschicht oder als gebundene Tragschicht unter einer wenig durchlässigen Deckschicht im Straßen,- Wege- und Verkehrsflächenbau sowie bei der Anlage von befestigten Flächen in Industrie- und Gewerbegebieten in Frage. Außerdem ist eine Verwertung in hydrologisch günstigen Gebieten bei Erdbaumaßnahmen als Lärm- und Sichtschutzwand oder als Straßendamm (Unterbau) möglich. Als hydrologisch günstig gelten Standorte, bei denen der Grundwasserleiter nach oben durch flächige Deckschichten mit hohem Rückhaltevermögen gegenüber den Schadstoffen überdeckt ist. Verwertbare Schlacke kann auch auf Deponien bautechnisch verwendet werden, z.B. als Ausgleichsschicht zwischen Abfallkörper und Oberflächenabdichtung.

Tabelle 4: Zuordnungswerte und Eluatuntersuchungen für Schlacken [LAGA M20 1997]

Parameter	Dimension	Zuordnungswert	Eignungsfeststellung	Fremdüberwachung	Eigenkontrolle
Färbung		- ¹⁾	+	+	+
Trübung		- ¹⁾	+	+	+
Geruch		- ¹⁾	+	+	+
pH- Wert		7-13	+	+	+
el. Leitf.	µS/cm	6000	+	+	+
DOC	µg/l	- ²⁾	+		
Arsen	µg/l	- ²⁾	+		
Blei	µg/l	50	+	+	
Cadmium	µg/l	5	+	+	
Chrom ges.	µg/l	200	+	+	
Kupfer	µg/l	300	+	+	
Nickel	µg/l	40	+	+	
Quecksilber	µg/l	1	+	+	
Zink	µg/l	300	+	+	
Chlorid	mg/l	250	+	+	
Sulfat	mg/l	600	+	+	
Cyanid (leicht löslich)	mg/l	0,02	+		

1) ist anzugeben
2) ist zur Erfahrungssammlung zu bestimmen

Es werden auch Baumaßnahmen genannt, bei denen eine Verwertung von Schlacke nicht erlaubt ist. In diesen Gebieten spielen hauptsächlich der Gewässerschutz, die Verteilung von Schadstoffen (Überschwemmungsgebiete, Karstgebiete) oder eine sensible Nutzung (Kinderspielplätze, Sportanlagen usw.) eine entscheidende Rolle.

Teil III: Probenahme und Analytik

Im Teil III "Probenahme und Analytik" sind allgemeine Grundsätze für die Vorgehensweise bei der Probenahme festgelegt; für diverse Probenbehandlungsarten sind die anzuwendenden Analyseverfahren und die Vorgehensweise zur Beurteilung der Analysenergebnisse geregelt. Dabei ist zu unterscheiden zwischen der Entnahme einer Probe des zu verwertenden Abfalls am Entstehungsort und der Entnahme am Ort der Verwertung zur Kontrolle des angelieferten oder eingebauten Materials.

Die Anwendung der erwähnten DIN- Normen und der in diesem Teil genannten Anforderungen an Probenahme, Probenvorbereitung und Analytik bilden somit die Grundlage für den Vergleich der gemessenen Schadstoffparameter mit den in den Technischen Regeln festgelegten Zuordnungswerten. Zu den allgemeinen Grundsätzen werden mit Bezug auf die Technischen Regeln aus Teil II auch abfallspezifische ergänzende Regelungen genannt.

Änderungen der LAGA- M20 und Ausblick

Die LAGA-M20 mit dem Stand 1997 ist mittlerweile veraltet. Die Einführung neuer Gesetze und Verordnungen im Abfall- und Bodenschutzrecht (KrW-/AbfG, BBodSchG, BBodSchV), die Konkretisierung der Anforderungen des Grundwasserschutzes durch die 2002 veröffentlichten "Grundsätze des vorsorgenden Grundwasserschutzes bei Abfallverwertung und Produkteinsatz" (GAP-Papier) [LAWA 2002] durch die Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) und neue wissenschaftliche Erkenntnisse zur Schadstoffverteilung (Literatur zur Sickerwasserprognose) und zum Umgang mit mineralischen Abfällen führten zur Notwendigkeit einer Anpassung der LAGA-M20.

Von der Umweltministerkonferenz (UMK) wurde die LAGA-AG "Mineralische Abfälle" beauftragt, das Regelwerk zu überarbeiten. Die Anpassung an die unterschiedlichen Rechtsvorschriften erwies sich auf Grund konkurrierender Forderungen als schwierig. Auf der einen

Seite sollen vor dem Hintergrund der Kreislaufwirtschaft Primärstoffe eingespart und der Landschaftsverbrauch durch Deponien vermieden werden und auf der anderen Seite muss der Schutz von Grundwasser und Boden berücksichtigt werden.

Die Überarbeitung des Allgemeinen Teils der LAGA-M20 wurde im November 2003 abgeschlossen. Ein Jahr später, im November 2004, folgte die überarbeitete Technische Regel Boden. Während im allgemeinen Teil größtenteils redaktionelle Überarbeitungen stattfanden, wurden in der Technischen Regel "Boden" die Zuordnungswerte erstmals systematisch an die neue gesetzliche Lage angepasst. Die Änderungen sollten bis zum Abschluss der Überarbeitungen in einer 5. erweiterten Auflage mit den verbleibenden Technischen Regeln von 1994 und 1997 und dem Teil III von 1994 veröffentlicht werden und wurden den Ländern zum Vollzug empfohlen. Der Großteil der Bundesländer übernahm die Änderungen, einige taten dies nur teilweise und einige entschlossen sich zum Vollzug eigener Regelungen. Nähere Informationen zur Überarbeitung und der Art und Weise der Anpassung der Zuordnungswerte an die Vorgaben des Abfall-, Boden- und Wasserrechts findet man in der Literatur [BERTRAM 2003] [BERTRAM 2004a] [BERTRAM 2004b] [DOETSCH 2004].

Die Überarbeitung der anderen Technischen Regeln gestaltete sich besonders problematisch. Umweltpolitische bzw. -fachliche Meinungen und Interessen standen mit ökonomischen Standpunkten im Konflikt und führten über lange Zeit zu keinem Konsens, der aber durch die Beschlusskraft der UMK nach dem Einstimmigkeitsprinzip nötig war. Betroffene Wirtschaftsbranchen und -verbände befürchteten eine Minderung der Verwertungsquoten durch Verschärfung der Zuordnungswerte.

Von der LAGA, den Ländern und der Wirtschaft wurden immer mehr Stimmen laut, die eine neue Verordnung auf Bundesebene forderten. Die weitere Überarbeitung der Technischen Regeln wurde abgebrochen, die LAGA erstellte auf der Grundlage der veröffentlichten LAGA-M20 und der im Rahmen der Überarbeitung gewonnenen Erkenntnisse ein "Eckpunkte-Papier", das den Entwurf der geplanten Verordnung auf Bundesebene unterstützen soll. Die LAGA-AG "Mineralische Abfälle" wurde im März 2004 aufgelöst.

In Rahmen von Gesprächen mit beteiligten Firmen, Aufsichtsbehörden usw. für diese Arbeit wurde deutlich, dass das Eckpunktepapier eher eine Zusammenfassung der Erkenntnisse darstellt und weniger eine Auflistung von zu erwartenden Zuordnungswerten ist. Ergänzend soll es mit der Einführung der neuen Verordnung ein neues Messverfahren geben. Vor diesem Hintergrund wurde entschieden, das Eckpunktepapier im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht im Detail zu berücksichtigen.

3.6 Straßenbaurecht

Im vorherigen Abschnitt wurde deutlich, dass die Möglichkeit einer Verwertung von Schlacke außer im Deponiebau bevorzugt im Straßen- und Wegebau besteht. Dabei sind neben den umweltrelevanten vor allem auch die bautechnischen Merkmale dieser Abfälle von großer Bedeutung.

In Deutschland werden von der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswegebau (FGSV) konkrete bautechnische Anforderungen für das Straßen- und Verkehrswesen herausgegeben. Die FGSV wurde 1924 als gemeinnütziger Verein gegründet und betreibt heute Geschäftsstellen in Köln und Berlin. Im Mittelpunkt der Tätigkeiten steht die weitere Entwicklung von technischen Erkenntnissen im Straßen- und Verkehrsbereich. Von den Gremien der FGSV wurde ein sehr umfassendes Regelwerk für Straßenbau, Straßenverkehrstechnik und Verkehrsplanung erarbeitet, das sich u. a. in Technische Lieferbedingungen (TL),

Technische Prüfvorschriften (TP), Merkblätter und Empfehlungen gliedert und regelmäßig aktualisiert wird.

Für die Verwertung von Schlacken aus der Abfallverbrennung sind die folgenden Schriften aus dem Regelwerk der FGSV zu beachten:

- "Technische Lieferbedingung für Gesteinskörnungen im Straßenbau – TL Gestein-StB 04 (FGSV-Nr. 613)" [TL GESTEIN-STB 04]
- "Technischen Lieferbedingungen für Baustoffgemische und Böden zur Herstellung von Schichten ohne Bindemittel im Straßenbau – TL SoB-StB 04“ (FGSV-Nr. 697) [TL SOB-STB 04]
- "Zusätzlichen Technischen Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Schichten ohne Bindemittel im Straßenbau – ZTV SoB-StB 04". (FGSV-Nr. 698) [ZTV SOB-STB 04].
- "Technischen Lieferbedingungen für Baustoffgemische und Böden zur Herstellung von Schichten ohne Bindemittel im Straßenbau, Teil: Güteüberwachung – TL G SoB-StB 04“ (FGSV-Nr. 696) [TL G SOB-STB 04]
- "Merkblatt über die Verwendung von Hausmüllverbrennungsasche im Straßenbau – M HMVA" (FGSV- Nr. 638) [M HMVA 2005]

Es ist davon auszugehen, dass mit der Erstellung einer bundeseinheitlichen Verordnung als Nachfolge für die LAGA-Vorschriften (Siehe Abschnitt 3.5.2) auch das Regelwerk der FGSV geändert wird.

4 Aktueller Stand bei der thermischen Abfallbehandlung

Die vorliegende Arbeit beschränkt sich auf Anlagen zur thermischen Behandlung von Hausmüll und ähnlichen Abfällen, die u. a. als Abfallverbrennungsanlage, Müllverbrennungsanlage (MVA), Müllkraftwerk (MKW) oder als Müllheizkraftwerk (MHKW) bezeichnet werden. Abbildung 3 zeigt die Entwicklung bei der Anzahl der Standorte und die Änderungen der Gesamtkapazität für die Anlagen in Deutschland.

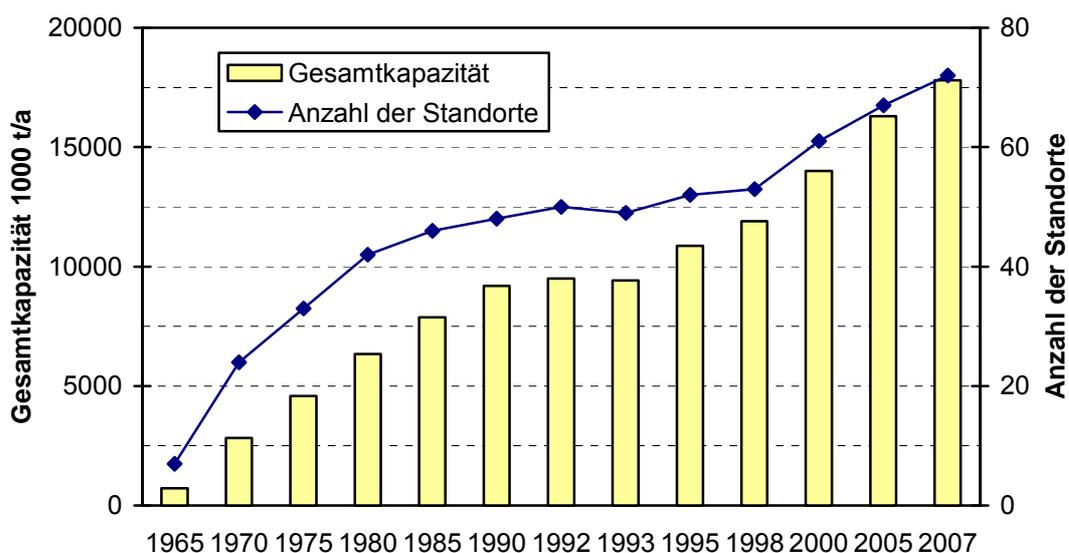


Abbildung 3: Entwicklung der Anzahl der MVA und ihre Gesamtkapazitäten in Deutschland

Die Anzahl der MVA stieg in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts zunächst stark an und stagnierte aufgrund von Vorbehalten gegen Schadstoffemissionen (u. a. Dioxinproblematik) in den 80ern bzw. Anfang der 90er Jahre bei ca. 50 Standorten. Mit der Einführung der TA Siedlungsabfall bzw. der Abfallablagereungsverordnung (siehe Abschnitt 3.4) stieg zusätzlich der Bedarf für die thermischen Abfallbehandlungsanlagen seit Ende der 90er Jahre an. Derzeit existieren in Deutschland 72 MVA mit einer jährlichen Gesamtkapazität von 17,8 Mio. Tonnen.

Es ist davon auszugehen, dass zukünftig über 20 Mio. Tonnen Abfall jährlich in deutschen MVAs thermisch behandelt werden können; außerdem wird über mindestens 40 Sekundär-brennstoffkraftwerke diskutiert [WALK 2007].

Eine Müllverbrennungsanlage (MVA) kann in vier Bereiche eingeteilt werden: Abfallanlieferung, Verbrennung, Energienutzung und Rauchgasreinigung. In Deutschland wird die Verbrennung von Abfällen überwiegend mit Rostfeuerungen durchgeführt, deren Aufbau weitgehend identisch ist. Größere Unterschiede zeigen sich bei der Art der Energienutzung und den Verfahren zur Rauchgasreinigung.

Die Funktionsweise einer MVA wird im Folgenden exemplarisch am Beispiel des MHKW Mainz vorgestellt. Das MHKW Mainz ging im Dezember 2003 in Betrieb und wird von der Entsorgungsgesellschaft Mainz mbH (EMG) geführt. Die Anlage verfügt über 2 Verbrennungslinien; im Jahr 2004 wurden 210.000 t Abfall mit einem durchschnittlichen Heizwert von 11 MJ/kg thermisch behandelt. In Abbildung 4 ist ein Längsschnitt der Anlage dargestellt.

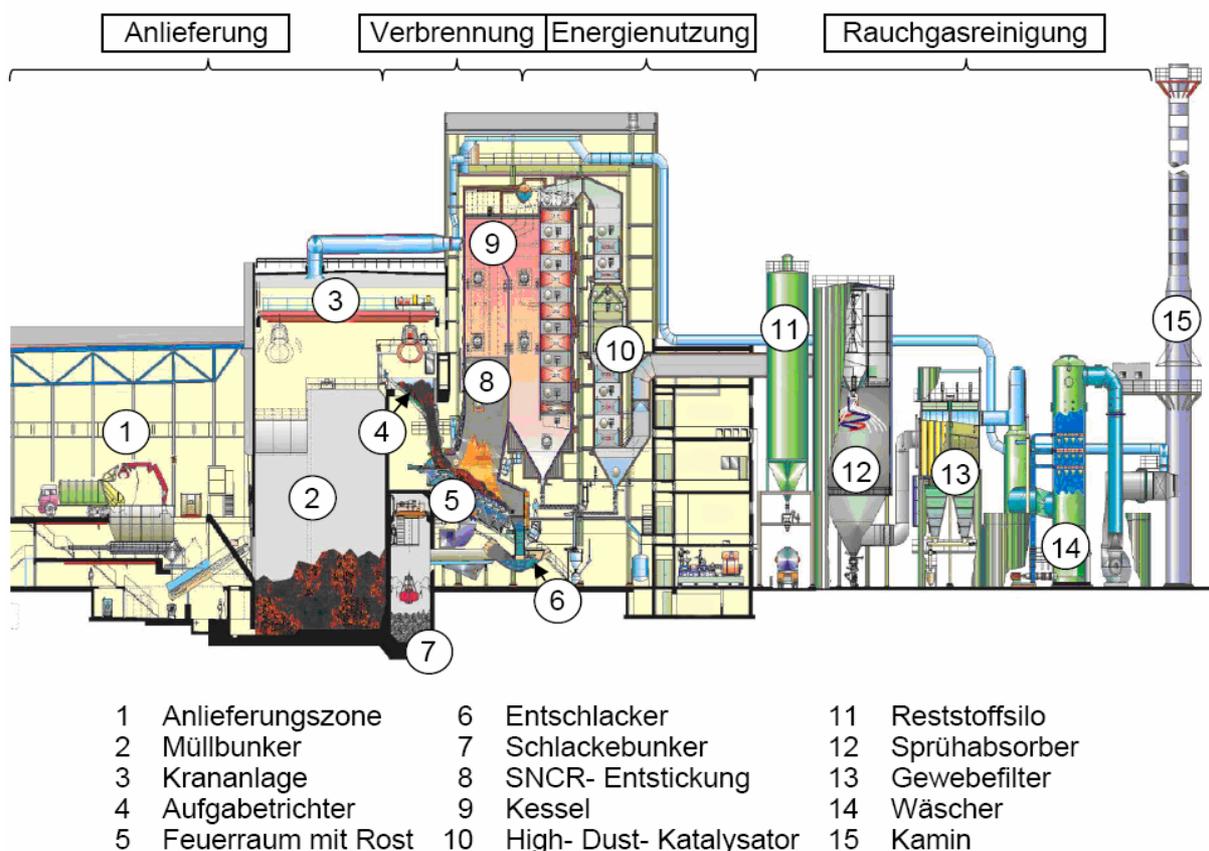


Abbildung 4: Längsschnitt durch das MHKW Mainz [MARTIN 2007a (angepasst)]

Bei dem angelieferten Abfall handelt es sich in der Regel um Hausmüll, Sperrmüll und Gewerbeabfall. In der Anlage wird der Abfall nach der Anlieferung (1) in einem Müllbunker (2) gesammelt. Sperrmüll wird separat durch mechanische Vorrichtungen zerkleinert und

ebenfalls dem Müllbunker zugeführt. Eine Krananlage (3) durchmischt den Abfall auf und befüllt den Beschickungstrichter (4), über den der Abfall mit Hilfe eines Dosierstößels in den Feuerraum auf den Rost (5) gelangt. Bei dem eingesetzten Rückschubrost wird der brennende Abfall durch langsame Misch- und Wälzbewegungen der einzelnen Rostsegmente bewegt und transportiert. Die zur Verbrennung erforderliche Luft, die so genannte Primärluft, wird aus dem Müllbunker abgesaugt und über mehrere Rostabschnitte durch den Rost bedarfsgerecht eingeblasen.

Im Verbrennungsraum wird der Müll bei Temperaturen im Bereich von ca. 1000 °C verbrannt. Der Verbrennungsprozess umfasst die Trocknung, Entgasung, Vergasung und erst danach die abschließende Verbrennung des Abfalls. Bei der Entgasung werden Schwelgase, insbesondere Kohlenwasserstoffe, bei Temperaturen größer 250 °C aus dem Abfall ausgetrieben. Unter Sauerstoffmangelbedingungen werden aus den Kohlenwasserstoffverbindungen durch Vergasungsreaktionen bei Temperaturen oberhalb 500 °C Kohlenstoffmonoxid und Wasserstoff gebildet. Durch Zufuhr von sogenannter Sekundärluft oberhalb des festen Brennbettes erfolgt eine praktisch vollständige Umsetzung der heizwertreichen Abgasbestandteile zu CO₂ und H₂O. Die hier erforderliche Verbrennungsbedingungen (min. T > 850 °C, t > 2 s) sind in der 17. BImSchV (Siehe Abschnitt 3.1) festgelegt. [KOZMIENSKY 1994] [BAYLFU 2002]

Im Brennbett kommt es beim Abbrandprozess aufgrund der hohen Temperaturen teilweise zum Aufschmelzen und folglich zum Verbacken von Aschepartikeln und Inertpartikeln (Sinterung). Die dabei ablaufenden Sinterprozesse führen letztendlich zu einer mineralischen Schlacke [BAYLFU 2002]. Die entstehende Schlacke fällt am Rostende (6a) in den Entschlacker (6), der in Abbildung 5 etwas detaillierter dargestellt ist.

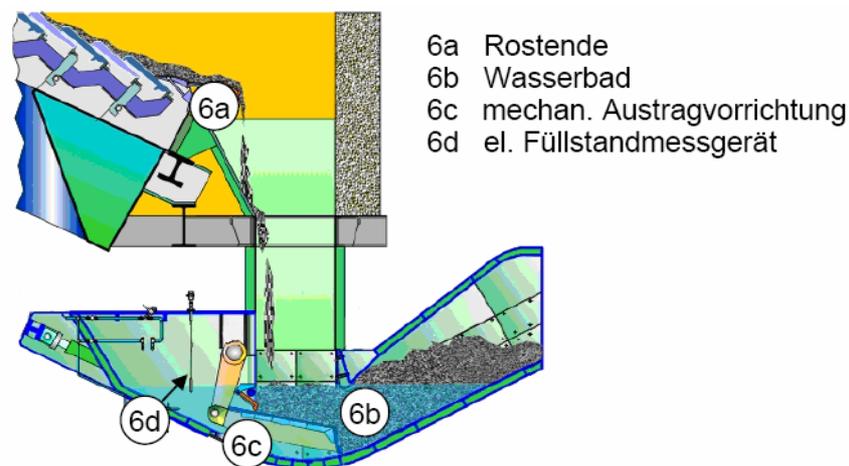


Abbildung 5: Entschlacker der Fa. Martin GmbH [MARTIN 2007b (angepasst)]

Im Entschlacker befindet sich ein Wasserbad (6b) zur Abkühlung der Schlacke. Zusätzlich stellt das Wasserbad einen luftdichten Abschluss zum Feuerraum her. Anschließend wird die abgekühlte Schlacke über mechanische Austragevorrichtungen (6c) in den Schlackebunker (7) ausgetragen, wo die Schlacke bis zur weiteren Aufbereitung zwischengelagert wird. Mit Hilfe eines Füllstandmessers (6d) wird die Wasservorlage im Entschlacker auf einem konstanten Niveau gehalten. Dadurch werden Verluste durch Verdampfung und Austrag der Nassschlacke kompensiert.

Im Fall einer Schlackewäsche wird die Schlacke zusätzlich mit Wasser besprüht, das anschließend aus dem Entschlacker abgeleitet wird. Auf diesem Weg können leicht lösliche Salze ausgewaschen werden.

Neben der Schlacke entsteht bei dem Verbrennungsprozess auf dem Rost ein Rauchgas. Die heißen Rauchgase geben ihre Wärmeenergie an die wasserdurchströmten Rohre des Kessels zur Dampferzeugung ab (9, in Abbildung 4). Für die Nutzung des erzeugten Dampfes sind an den MVA-Standorten in Deutschland unterschiedliche Konzepte realisiert. Das MHKW Mainz gibt den erzeugten Dampf an das benachbarte GuD-Kraftwerk zur Strom- und Fernwärmeerzeugung ab.

Die Rauchgasreinigung des MHKW Mainz besteht aus einer Kombination von verschiedenen Verfahren. Zunächst werden die hohen Temperaturen der Verbrennungsgase im ersten Kesselzug zur Entstickung mittels SNCR-Verfahren (8) unter Verwendung von Ammoniak genutzt. Im High-Dust-Katalysator (10) wird im Rauchgas verbliebenes Ammoniak für eine weitergehende Entstickung umgesetzt. Anschließend gelangt das Rauchgas zur weiteren Abkühlung in einen Sprühabsorber (12), wo durch Zugabe von Kalkmilch eine Vorabscheidung saurer Bestandteile wie SO_2 , HF und HCl stattfindet. Nach einer Zudosierung von Aktivkoks zur Bindung von Dioxinen/Furanen, Schwermetallen und anderen Schadstoffen gelangen die mit Additiven beladenen Rauchgase in einen Gewebefilter (13). Nachdem dort der im Rauchgas befindliche Staub und die beladenen Additive an den Filterschläuchen abgeschieden wurden, gelangt das Rauchgas in einen Wäscher. Hier werden insbesondere die Konzentrationen der sauren Rauchgasbestandteile weiter abgesenkt. Die Einhaltung der gesetzlich vorgeschriebenen Grenzwerte wird am Ende der Verfahrenskette durch Messeinrichtungen am Kamin (15) kontinuierlich nachvollzogen und dokumentiert.

Dieses Rauchgasreinigungskonzept des MHKW Mainz stellt nur eines der sehr vielen Rauchgasreinigungsvarianten dar. Eine nähere Erläuterung von anderen, technisch eingesetzten Rauchgasreinigungsvarianten und Energieumwandlungsverfahren ist in dem BREF-Dokument "Waste Incineration" der Europäischen Kommission [BREF WI 2006] zu finden. Für weitere Informationen zu Rauchgasreinigungssystemen wird auf die Literatur verwiesen (Siehe z.B. [VDI 3460 2002] [VDI 3460-2 2007] [ACHTERNBOSCH 2002]).

5 Stand der Aufbereitungstechnik von Schlacken

Durch Aufbereitung der Schlacken aus der Abfallverbrennung können Wertstoffe zurück gewonnen und Verbesserungen bei der Schlackequalität erreicht werden. Der Aufwand und die Kosten der Aufbereitung werden durch den vorgesehenen Entsorgungsweg für die Schlacke bestimmt.

Für die Aufbereitung von Schlacken können thermische Behandlungsverfahren und mechanisch-chemische Verfahren eingesetzt werden. Bei der thermischen Behandlung wird bei Temperaturen zwischen 1300 bis 1500 °C ein glasartiges Schlackegranulat erzeugt, das keine brennbaren, organischen Komponenten mehr enthält, und in dem Salze und Schwermetalle eingelagert sind [LÜCK 2004]. Hierzu wurden u. a. das RedMelt- Verfahren [KÖCHER 1991] oder das FosMelt- Verfahren [STEFFENS-T. 1993] [GROß 1993] entwickelt. Diese so genannte Verglasung von Schlacken hat sich in Deutschland bisher nicht durchgesetzt, da der dazu erforderliche Energiebedarf das Verfahren unwirtschaftlich macht [LÜCK 2004].

Im Fall der mechanisch-chemischen Aufbereitungsverfahren sind verschiedene Varianten zu unterscheiden. In Abhängigkeit vom Aufwand werden die Aufbereitungstechniken in einfache, konventionelle und weitergehende Aufbereitungsverfahren unterteilt.

Bei der **einfachen Aufbereitung** findet nach dem Entschlacker meist nur eine Schrottabscheidung mit Überbandmagnetscheidern (Siehe Abbildung 6) und anschließend eine Zwischenlagerung über wenige Tage bis Wochen statt.



Abbildung 6: Permanentüberbandmagnet der Fa. Steinert [KOHAUPT]

Auf Grund der anhaftenden Verunreinigungen beträgt der Eisengehalt der abgetrennten Schrottfraction lediglich 50 bis 60 Masse-% und muss deshalb vor seiner metallurgischen Verwertung durch weitere Aufbereitungsmaßnahmen in einen stahlwerksfähigen Wertstoff umgewandelt werden. Für die restliche Schlackefraction können die Anforderungen der AbfAbIV im Allgemeinen eingehalten werden und damit besteht die Möglichkeit der Deponierung. Die Anforderungen für eine Verwertung nach LAGA-M20 werden durch diese einfache Aufbereitung in der Regel nicht erfüllt.

Die meisten MVA- Betreiber führen die **konventionelle Aufbereitung** durch bzw. geben diese bei Dienstleistern in Auftrag. Nach einer dreimonatigen Lagerung wird bei dieser Aufbereitungsmethode eine Kombination von trockenen Verfahren angewendet. Dazu gehört eine manuelle Sortierung, Siebung, Zerkleinerung und die Magnetscheidung. Das Grob- und Feinkorn wird abgeschieden, und es entstehen mineralische Fraktionen mit definierten Kornklassen. Weiterhin werden grober Metallschrott sowie grobe unverbrannte Teile abgetrennt. Letzteres wird wieder in den Müllbunker zurückgegeben und durchläuft nochmals den Verbrennungsprozess. Die Abtrennung der Nichteisenmetallfraktion führt zu Erlösen und trägt zur Minderung der Aufbereitungskosten bei. Konventionell aufbereitete Schlacke finden daher meist nur durch Zuzahlung an den Aufbereiter als minderwertiger Sekundärbaustoff (Verfüllmaterial) oder im Deponiebau Verwendung [LÜCK 2004].

Den Verfahrensablauf der konventionellen Schlackeaufbereitungsanlage am Standort Breisgau (Baden-Württemberg) zeigt Abbildung 7 als ein Beispiel.

Nach der Anlieferung der Rohschlacke von der TREA Breisgau (Thermische Restabfallbehandlungs- und Energieverwertungsanlage Breisgau) und einer Vorlagerung von 4 Wochen werden zuerst grobe Stoffe und unverbrannte Bestandteile > 400 mm mit einem Sieb abgeschieden. Danach durchläuft die Schlacke 2 weitere Siebe (58 und 11 mm), sowie 3 Magnetabscheider und 1 Wirbelstromabscheider zur Abtrennung von Eisen und Nichteisenmetallen, so dass am Ende eine Schlacke mit einem Kornspektrum 0/56, deren Kornabstufung je nach Abnehmerwünschen auf z.B. 0/5, 0/11 bzw. 11/56 verändert werden kann. Im Anschluss daran lagert die Schlacke noch mindestens weitere zwei Monate nach; anschließend soll das Material hauptsächlich zum Aufbau der Oberflächenabdichtung auf den zur Rekultivierung anstehenden Deponien des Breisgaus und zur Verfüllung der umliegenden auch nach 2005 in Betrieb befindlichen Deponien dienen. [FREMGEN 2004]

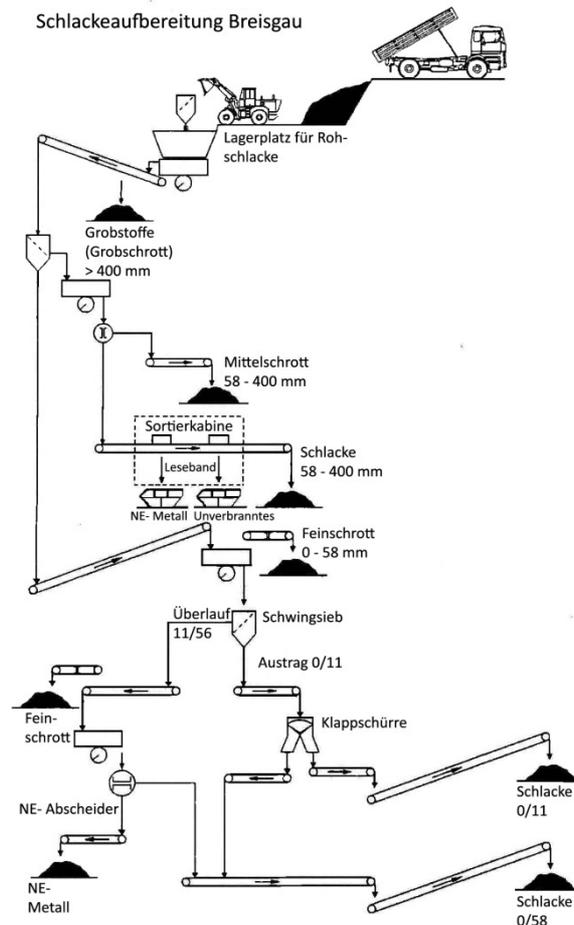


Abbildung 7: Schlackeaufbereitungsanlage am Standort Breisgau [FREMGEN 2004]

Bei der **weitergehenden Aufbereitung** werden ebenfalls nach einer Lagerung von drei Monaten die Verfahren der konventionellen Aufbereitung durch weitere technische Verfahren ergänzt. Dazu gehören u. a. nassmechanische Verfahren, zur Aussortierung feinkörnigen Eisenschrotts und zur vollständigen Auslese von Unverbrannten. Außerdem erfolgt eine weitergehende Abtrennung von feinen Eisen- und Nichteisenmetallen. Mit der weitergehenden Aufbereitung sollen eine definierte Kornverteilung mit geringen Unter- und Überkornanteilen, gute physikalische Eigenschaften, wie hohe Kornfestigkeit und geringe Porosität, sowie eine maximale Schadstoffentfrachtung und weitgehende Abscheidung von leichtlöslichen Salzen erreicht werden [LÜCK 2004].

Als Beispiel ist in Abbildung 8 eine Übersicht zum Verfahrensablauf der Aufbereitung von MVA-Schlacke der Unternehmensgruppe Scherer + Kohl dargestellt.

Nach einem trockenen Verfahrensschritt, ähnlich dem Verfahren am Standort Breisgau, wird das gesamte Eingangsmaterial in einer Prallmühle auf <22 mm gemahlen und zusammen mit dem Feingut einer nassen Aufbereitung zugeführt. Nach einer erneuten Magnetscheidung wird der Materialstrom auf einem Schwingsieb unter Wasserzuführung bei 2 mm getrennt. Die dabei erzeugten Kornklassen werden in einem Hydrobandabscheider von Störstoffen, vorwiegend Unverbrannten, befreit. Das Feinkorn <2 mm wird danach in einem Sandabscheider in zwei Sandqualitäten getrennt, die nach einer Entwässerung auf Spaltsieben als Sekundärbaustoff, z.B. als Kabelsand, verwertet werden können. Das Kornspektrum 2 bis 22 mm wird auf Schwingsieben in mehrere Fraktionen klassiert und anschließend über einen Wirbelstromabscheider zur Aussortierung von NE-Metallschrott geführt. [LÜCK 2004]

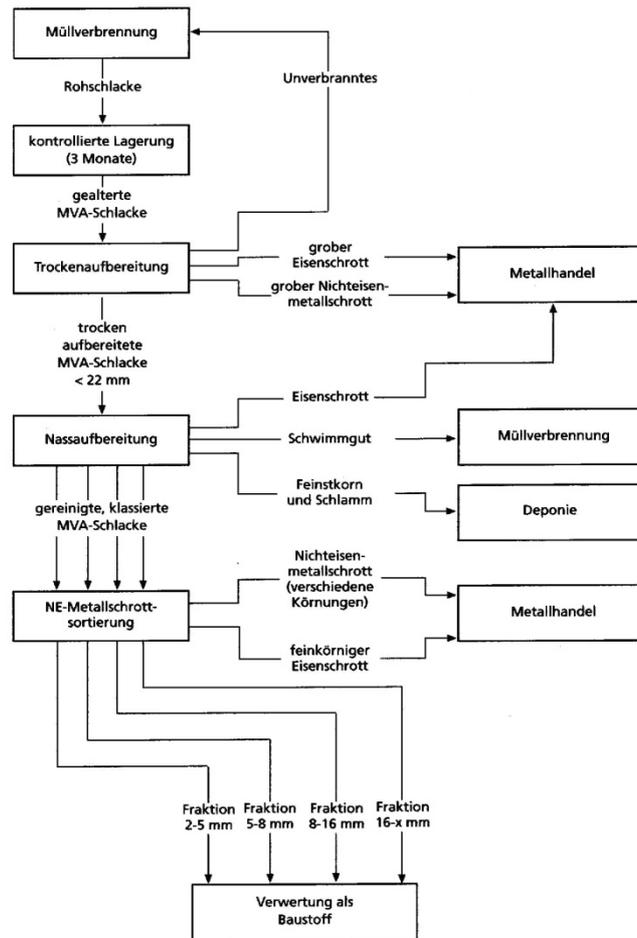


Abbildung 8: Verfahren zur weitergehenden Aufbereitung von Müllverbrennungsschlacke der Unternehmensgruppe Scherer + Kohl [LÜCK 2004]

Zu der weitergehenden Aufbereitung gehört auch die Nassmechanische Aufbereitung, die in einer Kieswaschanlage vom Hanseatischen Schlackenkontor GmbH in Hamburg getestet wurde [ZWAHR 2006]. Dabei wurde der Feinanteil kleiner 0,5 mm nahezu vollständig vom restlichen Schlacke-Granulat entfernt und das in der Schlacke enthaltene Glas wurde deutlich erkennbar, wodurch es mittels optischer Trennverfahren aussortiert werden könnte [ZWAHR 2006].

Eine weitergehende Aufbereitung ist kostenintensiv, kann jedoch zu vielseitigen Einsatzmöglichkeiten der verschiedenen Produkte führen [ZWAHR 2006]. Nebenbei wird die Akzeptanz in der Öffentlichkeit, bei Überwachungsbehörden und bei öffentlichen und privaten Bauträgern gegenüber diesem Sekundärbaustoff erhöht. Die Produkte aus dieser aufwändigen Aufbereitung können Produktqualitäten erlangen, die den anerkannten Sekundärbaustoffen entsprechen [LÜCK 2004].

6 Wissensstand zur Charakterisierung von Schlacken

Nicht aufbereitete Schlacken aus der Abfallverbrennung stellen ein sehr heterogenes Material, das in der Literatur unter stofflichen, chemischen und mineralogischen Aspekten betrachtet wird. Heute gibt es umfassende Erkenntnisse über die verschiedenen Einflussgrößen auf die Schlackequalität. Dazu gehören im Wesentlichen die Zusammensetzung des Abfallinputs, die Feuerungstechnik und das Alterungsverhalten der Schlacke.

In den folgenden Abschnitten werden zu diesen Einflüssen die wichtigsten Erkenntnisse aus der Literatur zusammengefasst. Des Weiteren werden die derzeitigen Kenntnisse über das

Mobilisierungsverhalten von Schadstoffen, die in der Schlacke enthalten sind, beim Kontakt mit Wasser dargestellt. Um den Umfang dieses Kapitels auf ein sinnvolles Maß zu beschränken wird auf die Mineralogie von Schlacken nur sehr kurz eingegangen.

6.1 Makroskopische Zusammensetzung

Allgemein stellen Schlacken aus der Abfallverbrennung Mehrkomponentensysteme dar. Sie bestehen einerseits aus Asche, Schmelzprodukten und einem geringem Anteil Unverbrannten. Andererseits sind Materialien enthalten, die den Verbrennungsprozess weitgehend unverändert durchlaufen. Dazu gehören Metallschrott (Eisen- und Nichteisenmetalle), Glas- und Keramikbruchstücke sowie bauschuttähnliche Bestandteile wie Beton, Ziegel oder Steine [WIMMER 2001] [HENTSCHEL 1999] [PFRANG-STOTZ 2005].

Die Feinfraktion unter 2 mm, oft als Asche bezeichnet, besteht aus anorganischen Rückständen, Russpartikeln, nicht brennbaren Staubpartikeln und feinkörnigem Abrieb von Glas-, Keramik-, Gesteins- und Metallkomponenten [WIMMER 2001] [PRETZ 1999] [HIRSCHMANN 1999]. Sie bildet in der Regel die Matrix, in die die grobkörnigen Bestandteile (Durchläufer) eingelagert sind [HIRSCHMANN 1999].

Die Aschepartikel bilden durch partielle Aufschmelzung Schmelzprodukte [EIGHMY 1994], die hauptsächlich aus neu gebildetem Glas sowie neu entstandenen kristallinen Phasen bestehen [HIRSCHMANN 1999]. Asche und Schmelzprodukte machen etwa 85 Masse-% der Trockenmasse der Schlacke aus [KNORR 1999, HENTSCHEL 1999]. Die restlichen 15 Masse-% stellen Durchläufer aus dem Müllinput dar. Diese können mit den Schmelzprodukten verbunden sein. [HENTSCHEL 1999, HIRSCHMANN 1999]. Die unverbrannten Rückstände enthalten hauptsächlich Papier-, Holz-, Kunststoff- oder Textilbestandteile [PRETZ 1999].

6.2 Chemische Zusammensetzung

Die Schlacken aus der Abfallverbrennung bestehen überwiegend aus Silikat-, Oxid- und Carbonatverbindungen [PFRANG-STOTZ 1996] [PFRANG-STOTZ 2005] [HENTSCHEL 1999]. Die elementare Zusammensetzung wird weitgehend durch Silizium, Calcium, Eisen und Aluminium bestimmt. Weitere Hauptbestandteile sind Natrium, Magnesium, Kalium, Phosphor, Schwefel, Chlor und Kohlenstoff. Im Spurenbereich sind Barium, Strontium, Rubidium, Titan, Mangan, Fluor und die Schwermetalle Arsen, Blei, Cadmium, Chrom, Kupfer, Nickel, Quecksilber, Zinn und Zink enthalten. Den Hauptanteil der Anionen bilden Chlorid und Sulfat, daneben können auch Fluorid und Phosphat nachgewiesen werden. [PFRANG-STOTZ 2005] [HENTSCHEL 1999] [KNORR 1999] [REIMANN 1996]

Den Gesamtkohlenstoffgehalt der Schlacke kann man in organisch gebundenen Kohlenstoff und anorganischen Kohlenstoff unterteilen. Der anorganische Kohlenstoff liegt überwiegend in Form von Carbonaten vor. Der Anteil dieser Gruppen hängt von der Ausbrandgüte ab, die in erster Näherung durch den Glühverlust charakterisiert wird. Bei einem schlechten Ausbrand überwiegt der organisch gebundene Kohlenstoff und bei einem guten Ausbrand liegen beide Kohlenstoffarten etwa zu gleichen Anteilen vor [KÖSTER 2002] [MOSER 2006] [KNORR 1999].

Tabelle 5 gibt die in vielen Literaturstellen zitierten Schwankungsbreiten und entsprechenden Mittelwerte der Elementgehalte nach [Reimann 1996] an. Es ist zu beachten, dass in der realen Schlacke die aufgeführten Bestandteile in erheblichem Umfang als Oxide vorliegen.

Tabelle 5: Chemische Zusammensetzung Schlacken - Zusammenfassung von Messergebnissen nach 1990 von Reimann [REIMANN 1996]

Elemente		Minimum	Maximum	Mittelwert
Hauptbestandteile				
Silizium	[g/kg]	140	320	232
Calcium		30	140	101
Eisen		20	110	48
Aluminium		5	95	50
Natrium		5	35	24
Magnesium		4	18	14
Kalium		3	21	12
Phosphor		3	34	6,1
Schwefel		2	4	2,9
Chlor		0,3	6,3	2,7
Kohlenstoff		5	50	16,6
Spurenelemente				
Arsen	[g/kg]	0,003	0,022	0,012
Blei		0,6	5,2	1,6
Cadmium		0,0001	0,082	0,01
Chrom		0,1	9,6	0,5
Kupfer		0,2	7,0	2,2
Nickel		0,04	0,76	0,15
Quecksilber		0,0001	0,02	0,0006
Zinn		0,2	1,7	0,57
Zink		0,5	21	4,8
Fluor		0,02	1,1	0,33

6.3 Mineralogische Eigenschaften

Die mineralogische Beschaffenheit von Schlacken der thermischen Abfallbehandlung bestimmt im Wesentlichen deren chemisches und physikalisches Verhalten hinsichtlich umweltrelevanter und somit verwertungstechnischer Aspekte. Die Mineralogie von Schlacken wird entscheidend von der chemischen Zusammensetzung bestimmt hängt stark vom Zeitpunkt der Betrachtung ab.

Nach [PFRANG-STOTZ 1996] können zur detaillierten Beschreibung der mineralogischen Beschaffenheit von Schlacken vier unterschiedliche Arten voneinander abgegrenzt werden:

- Ofenschlacke bezeichnet die frische Schlacke nach dem Rost und vor dem Entschlacker,
- Rohschlacke bezeichnet die frische Schlacke nach dem Entschlacker,
- Schlacke bezeichnet die aufbereitete und mindestens drei Monate abgelagerte Schlacke
- Alterierte Schlacke bezeichnet die über einen längeren Zeitraum (Jahre) abgelagerte Schlacke.

Diese vier Schlackearten können nach Angaben von Pfrang-Stotz [PFRANG-STOTZ 1996] einen unterschiedlichen Mineralbestand aufweisen.

Nach [HIRSCHMANN 1999] sind 60 % der nichtmetallischen Schlackeinhaltsstoffe amorph und etwa 40% kristallin, wobei die silikatischen Glasphasen den Hauptanteil der amorphen Phasen darstellen [HENTSCHEL 1999]. Die mineralogischen Hauptbestandteile bilden Quarz (SiO_2), Calcit (CaCO_3), Anhydrit (CaSO_4), Spinelle (Hercynit (FeAl_2O_4), Magnetit (Fe_3O_4), Chromit (FeCr_2O_4)) und Minerale der Mililith- Gruppe (Gehlenit ($\text{Ca}_2\text{Al}(\text{AlSi})\text{O}_7$), Akermanit ($\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$) etc.) [HENTSCHEL 1999].

[HENTSCHEL 1999] und [PFRANG-STOTZ 1996] beobachteten eine starke Abhängigkeit der Mengenanteile der jeweiligen Mineralphasen von der Korngröße. In der Fraktion von 8 bis 32 mm ist der Anteil amorpher Phasen beispielsweise mit 70 bis 82 Masse-% höher als in der Fraktion im Bereich von 0 bis 8 mm mit 62 bis 77 Masse-% [HENTSCHEL 1999]. In der groben Fraktion findet man viele Minerale aus dem aufgegebenen Abfall, die den Verbrennungsprozess weitgehend unverändert durchlaufen. Diese Minerale sind vorwiegend Silikate und Oxide, die für die physikalischen Eigenschaften der Schlacke verantwortlich sind. In der Feinfraktion treten verstärkt Sulfate, Chloride und Carbonate auf, die vorwiegend die chemischen Eigenschaften bestimmen.

6.4 Einfluss des Abfallinputs auf die Eigenschaften von Schlacken

Die sehr heterogene Zusammensetzung der Schlacke wird bei der Abfallverbrennung in erster Linie durch den Abfall bestimmt. Der als Brennstoff eingesetzte Abfall unterliegt sowohl saisonalen Veränderungen als auch lokalen abfallwirtschaftlichen Gegebenheiten.

Der Abfallinput deutscher Müllverbrennungsanlagen setzt sich überwiegend aus variierenden Anteilen von Hausmüll, hausmüllähnlichen Gewerbeabfall und Sperrmüll zusammen. Ansonsten werden Restabfälle aus der Kompostierung, Rückstände aus der Abfallaufbereitung und Klärwerksrückstände eingesetzt.

Die Zusammensetzung dieser Abfallarten lässt sich wiederum in Abfallfraktionen aufteilen. In Abbildung 9 ist die mittlere Zusammensetzung des Abfallinputs deutscher Müllverbrennungsanlagen nach Fraktionen dargestellt. Sie wurde 2002 vom Öko-Institut e.V. [DEHOUST 2002] mittels Auswertung verschiedener Literaturquellen abgeschätzt. Dabei wurde angenommen, dass der Gesamtinput aus 56 % Hausmüll, 37 % Gewerbeabfall und 7 % Sperrmüll besteht.

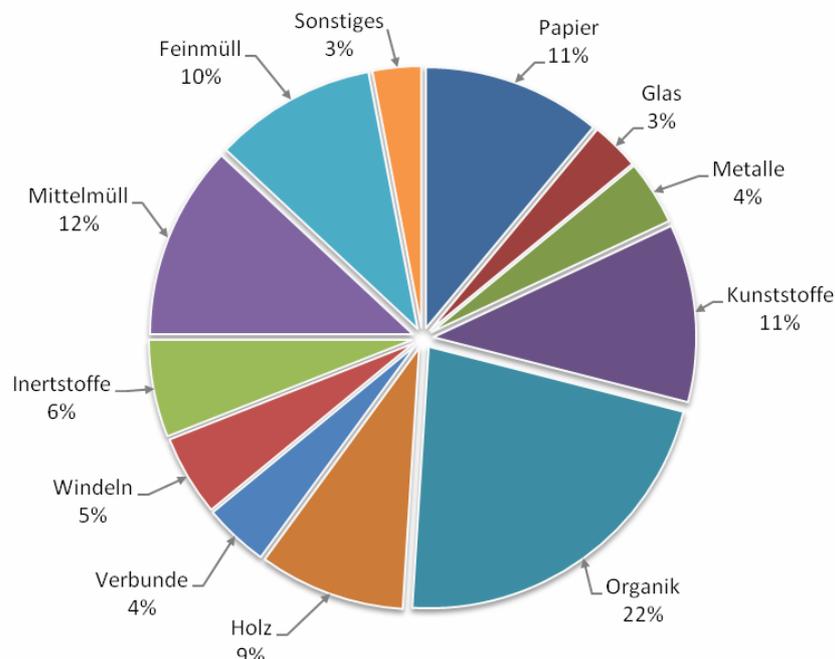


Abbildung 9: Zusammensetzung des Abfallinputs (Feuchtsubstanz), Summe aus Hausmüll, Sperrmüll und Gewerbeabfällen [DEHOUST 2002]

Den größten Anteil an der Gesamtmasse bilden die organischen Abfälle. Danach sind die Fraktionen Feinmüll (0-8 mm) und Mittelmüll (8-40 mm) und die heizwertreichen Fraktionen Kunststoffe, Papier/Pappe/Kartonagen und Holz mit jeweils ähnlich großen Anteilen zu nennen. Die restlichen Fraktionen haben dagegen nur geringe Anteile. Fein- und Mittelmüll

sind stofflich heterogen zusammengesetzt. Feinmüll besteht größtenteils aus mineralischen Komponenten wie Asche aus Ofenheizungen, Kehricht und Katzenstreu, während Mittelmüll bis zu 90 % aus biogenem Material besteht. [WEIGAND 2005]

Die Zusammensetzung der Schlacke, die bei der Verbrennung entsteht, wird in erster Linie durch die Mobilität der chemischen Elemente bzw. deren Verbindungen im Verbrennungsprozess bestimmt. Des Weiteren spielen die Verbrennungsbedingungen, insbesondere die Temperatur, eine sehr wichtige Rolle [HENTSCHEL 1999].

Leicht flüchtige Elemente und Verbindungen wie z.B. Quecksilber und Cadmium verlassen das Gutbett auf dem Rost und reichern sich im Abgasstrom bzw. in den Flugaschen an. Schwerflüchtige Elemente und Verbindungen wie z.B. Chrom und Kupfer verbleiben überwiegend im Gutbett [REIMANN 1988] [ANGENEND 1990] [HENTSCHEL 1999].

Außerdem können an feine Partikel gebundene schwerflüchtige Elemente in den Abgasstrom mitgerissen werden, während leichtflüchtige Elemente in Bereichen des Gutbetts zurückbleiben können, in denen die zur Verflüchtigung notwendigen Temperaturen nicht erreicht wurden [HENTSCHEL 1999].

Der Siliziumgehalt der Schlacke wird in erster Linie durch Glas im Hausmüll bestimmt, d.h. Flaschen, Scherben oder Geschirr. Calcium stammt ebenfalls vorwiegend aus Hausmüll und hausmüllähnlichen Gewerbeabfällen, die Calciumcarbonate enthalten, wie z.B. Papier, Karton und Essensreste. Der Gehalt von Aluminium und Eisen in den Schlacken hängt hauptsächlich von der Effizienz der Abfallaufbereitung vor der Verbrennung bzw. der Schlackeaufbereitung nach der Verbrennung ab. Der Anteil von Chlor ist im Wesentlichen vom Anteil der Kunststoffe abhängig [RENDECK 2007]. Eine weitere Quelle stellt der Natriumchloridgehalt aus den Essensresten dar.

Unterschiedliche Abfallzusammensetzungen spiegeln sich laut [PFRANG-STOTZ 2005] vor allem in der mineralogischen Phasenzusammensetzung der Fein- und Grobfraction von Schlacken aus der Abfallverbrennung wider. Durch unterschiedliche Anhydrit- (CaSO_4) und Calcitgehalte (CaCO_3) kommt dies in der Feinfraktion besonders deutlich zum Ausdruck. In der Grobfraction wirken sich unterschiedliche Abfallzusammensetzungen in erster Linie auf die Gehalte der mit dem Müll in den Verbrennungsraum eingebrachten Quarze und/oder Feldspäte aus, während die Gehalte an neu gebildeten Silikaten und Oxiden nahezu gleich bleiben.

Über den Verbleib der im Abfall enthaltenen Schwermetalle und anderen Elementen wie Chlor und Schwefel wurden umfangreiche Studien durchgeführt. Detaillierte Hinweise auf Transferkoeffizienten, die eine Verteilung der Schwermetalle auf die verschiedenen Stoffströme beschreiben, sind aus der Fachliteratur wie z.B. [BELEVI 1998] [BELEVI 2000a] [BELEVI 2000b] zu entnehmen.

Wiese [WIESE 1998] untersuchte die Abhängigkeit der Schwermetallkonzentrationen von der Abfallzusammensetzung, in dem alle hinsichtlich der Schwermetalle relevanten Abfallkomponenten abgetrennt wurden. Diese Maßnahme führte jedoch nur zu einer geringen Absenkung der Schwermetallkonzentrationen in der Schlacke, die im Vergleich zu den möglichen Schwankungsbreiten der Schwermetallkonzentrationen von untergeordneter Bedeutung ist. Entsprechend der Heterogenität von Rest-Siedlungsabfällen bestehen zahlreiche Möglichkeiten des Eintrages von Schwermetallen in die Schlacke. [WIESE 1998]

6.5 Einfluss der Feuerungstechnik auf die Beschaffenheit der Schlacke

Nach [KOZMIENSKY 1994] ist die Schlacke aus thermischen Abfallbehandlungsanlagen mehr oder weniger ein „Zufallsprodukt“, das in erster Linie von der Beschaffenheit des Aufgabematerials aber auch von der Verbrennungsprozesssteuerung abhängig ist.

Die vier in Abschnitt 4 genannten Reaktionsvorgänge Trocknung, Entgasung, Vergasung und Ausbrand überlagern sich im Gutbett auf dem Rost und hängen wesentlich von der Durchmischung des Abfalls auf dem Rost ab. Zusätzlich werden sie von der Geometrie des darüber liegenden Brennkammerraums beeinflusst. Im Folgenden werden die verschiedenen Haupteinflussgrößen dargestellt und erläutert.

Der Rost wird durch das Beschickungssystem, die Austragvorrichtung sowie durch nicht gekühlte oder wasser- oder luftgekühlte Seitenwände begrenzt. Unterhalb des Rostes befinden sich in der Regel Rostdurchfalltrichter und oberhalb der Feuerraum, der wiederum durch eine Decke mit einer Abzugsöffnung für das Rauchgas begrenzt ist.

Hinsichtlich der Rostart unterscheidet man zwischen Vorschubrost, dem Rückschubrost und dem Walzenrost. Während Rückschub- und Walzenrost nur in geneigter Form vorkommen, gibt es beim Vorschubrost mehrere Varianten. Es existieren sowohl geneigte als auch waagerechte Ausführungen, die einstufig oder mehrstufig ausgeführt sein können. Abbildung 10 zeigt stark vereinfacht das Prinzip der drei Rostarten.

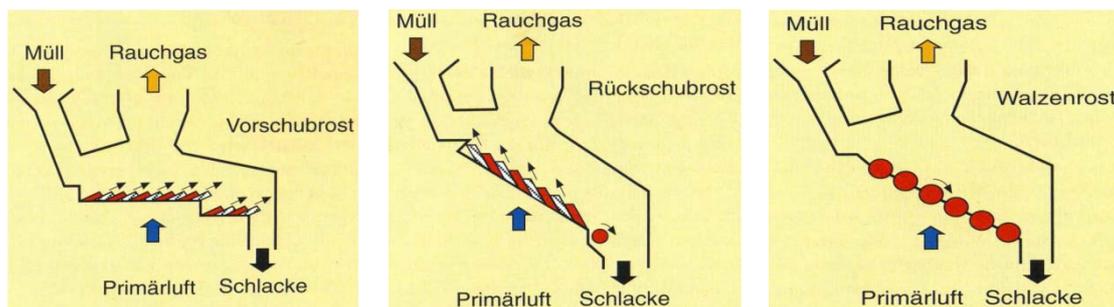


Abbildung 10: Schematische Darstellungen verschiedener Rostarten für Abfallverbrennungsanlagen [KOZMIENSKY 1994]

Beim Vorschub- und Rückschubrost wird das Brenngut über mehrere Reihen feststehender und sich bewegender Roststäbe transportiert. Der Walzenrost besteht aus mehreren Walzen mit integrierter Luftzuführung. Zwischen den Walzen befinden sich Abstreifer, die den auf der Walze liegenden Müll abstreifen und der nächsten Walze zuleiten.

Neben dem Transport des Brenngutes wird über die Roststäbe die Primärluft zum Feststoffausbrand zugeführt. Durch die gezielte Verteilung der Luft auf die einzelnen Rostzonen können die Verbrennungsvorgänge und die Temperaturniveaus im Gutbett und indirekt im Feuerraum oberhalb des Rostes gesteuert werden.

Da die Roststäbe hohen Wärmebelastungen ausgesetzt sind, werden die einzelnen Elemente entweder durch Luft (in diesem Fall die Primärluft) oder mit einem Kühlwasserkreislauf gekühlt [KOZMIENSKY 1994]. Die Rostarten bewirken eine deutlich unterschiedliche Effizienz der Gutbettdurchmischung. Während bei dem einstufigen Vorschubrost nahezu eine Kolbenströmung des Gutbetts vorliegt, weisen Rückschubroste eine intensive Durchmischungscharakteristik des Brennbettes auf. Im Fall der Vorschubroste wird durch den Einbau von abgesetzten Stufen ebenfalls eine Durchmischung erreicht. [HUNSINGER 2007]

Für die Feuerraumgeometrie gibt es prinzipiell drei unterschiedliche Gestaltungsmöglichkeiten, die Gleichstrom-, die Gegenstrom- und die Mittelstromfeuerung. Abbildung 11 stellt vereinfacht das Prinzip dieser drei Varianten dar.

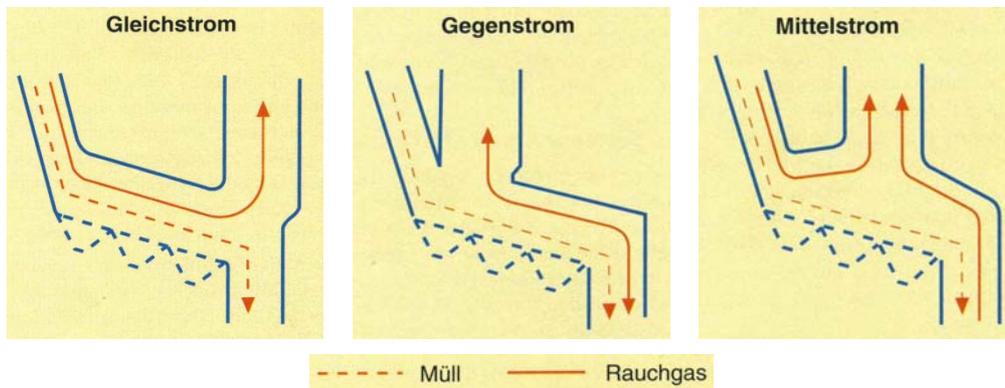


Abbildung 11: Schematische Darstellungen für Feuerraumgeometrien von Abfallverbrennungsanlagen [KOZMIENSKY 1994]

Die Bezeichnungen sind aus der Strömungsrichtung der Rauchgase in Bezug auf die Abfalltransportrichtung hergeleitet [KISTERS 1988]. Durch die unterschiedlichen Rauchgasführungen werden Temperaturverteilungen im Feuerraum und im Gutbett auf dem Rost (Trocknungs- /Zündzone und Abbrandzone) wesentlich beeinflusst. Dies bewirkt eine unterschiedliche Lage der Trocknungs-, Zünd- und Ausbrandzone im Gutbett.

Bei der Gleichstromfeuerung entstehen eine ausgedehnte Trocknungs- und Zündzone am Anfang und eine Abbrandzone mit Temperaturmaximum am Ende des Rostes. Dagegen wird im Fall einer Gegenstromfeuerung die Trocknungs- und Zündzone im Brennbett deutlich verkürzt, wobei das Temperaturmaximum im Brennbett in Richtung des Brennstoffeintrags verschoben ist. Die Temperaturen sind am Rostende bei der Gegenstromführung niedriger als bei der Gleichstromführung.

Aus diesen Gründen empfiehlt sich die Gleichstromfeuerung bei heizwertreichen Abfällen und die Gegenstromfeuerung bei feuchtem heizwertarmen Müll. Auf Grund der stark schwankenden Heizwerte hat sich ein Kompromiss, die Mittelstromfeuerung, weitgehend durchgesetzt. Sie ist mittlerweile in Deutschland die am weitesten verbreitete Feuerraumgeometrie. [KISTERS 1988] [KOZMIENSKY 1994]

Die Feuerungstechnik wirkt sich wesentlich auf den Ausbrand der Schlacke aus. Als wichtigste Bewertungskriterien für die Qualität des Ausbrandes gelten der Glühverlust und der Restkohlenstoffgehalt (TOC). Der TOC stellt den noch brennbaren Anteil der trockenen Schlacke dar, dessen Größe im Wesentlichen von der Art des Rostes, der Menge der zugeführten Primärluft, der thermischen Rost- und Feuerraumbelastung und der Verweilzeit des Abfalls auf dem Rost beeinflusst wird.

Wie schon im Abschnitt 3.1 (BImSchG) dargestellt, werden für die Ausbrandgüte an den Betreiber konkrete Anforderungen gestellt. Das bedeutet, das sowohl bei der Errichtung durch die Auswahl der Feuerungstechnik als auch beim Betrieb durch die Abstimmung der einzelnen im Vorfeld genannten Einflussgrößen diese Vorgaben beachtet bzw. eingehalten werden müssen. Dabei spielt vor allem die Prozesssteuerung eine große Rolle, mit der trotz großer Schwankungen auf Grund der Heterogenität des Abfallinputs die Ausbrandgüte am Ende des Rostes im Bereich der Vorgaben gehalten wird.

Nach [RENDECK 2007] wird empfohlen, für einen guten Ausbrand den Feuerraum nicht zu überladen. Ein geringer Teil des Brennstoffs oder der gebildeten Schlacke fällt bei allen Rostkonstruktionen als so genannter Rostdurchfall durch die Luftschlitze der Primärluftzufuhr des Rostes. Die Menge und Eigenschaften der Rostdurchfälle werden durch die Abfallzusammensetzung, die Bauart und die Betriebsdauer des Rostes sowie durch die Abnutzung der Rostelemente beeinflusst [KNORR 1999].

Dieser Rostdurchfall enthält noch große Anteile an Unverbranntem und sollte daher in die Brennstoffaufgabe zurückgeführt werden.

Wesentliche Einflüsse der Feuerungstechnik auf die Schlackequalität sind bisher nur in sehr geringem Umfang veröffentlicht worden. Nach [PFRANG-STOTZ 2005] haben die Gutbetttemperaturen einen deutlichen Einfluss auf die Anteile an neu gebildeten Glasphasen und das auftretendem Mineralspektrum, insbesondere den mengenmäßigen Anteil des Calciumsulfates. Darüber hinaus hat [HERDEN 2007] festgestellt, dass der TOC-Gehalt in der Schlacke im Vergleich zu wassergekühlten Rosten bei luftgekühlten Rosten geringer ist.

Eine Erhöhung der Gutbetttemperatur durch eine Sauerstoffanreicherung der Primärluft wurde von [HENTSCHEL 1999] untersucht. Eine gezielte Sauerstoffanreicherung der Primärluft auf im Mittel 28 Vol-% führt zu einer Zunahme der Gutbetttemperatur um etwa 130 °C. Dadurch wurde sowohl der Glühverlust als auch der TOC der Schlacke vermindert.

Diese Vorgehensweise wird von der Fa. Martin GmbH unter dem Namen SYNCOM vertrieben. Bei diesem Verfahren handelt es sich um die Verbrennung auf einem Rückschubrost, der mit sauerstoffangereicherter Primärluft betrieben wird [MARTIN 2007].

6.6 Alterungsverhalten

Das Alterungsverhalten wird durch den Austrag der Schlacke aus dem Feuerraum beeinflusst. Am Rostende wird die heiße Schlacke beim Eintritt in den Nassentschlacker abgeschreckt; und unter diesen Bedingungen wird der Glasanteil in der Schlacke fixiert [PFRANG-STOTZ 1996]. Die Schlacke nimmt im Wasserbad ca. 20 bis 35 Gew.-% Wasser auf [HENTSCHEL 1999]. Folglich können Hydratisierungsreaktionen ablaufen, bei denen sich erste neue Mineralphasen bilden. Es kommt insbesondere zur Umwandlung des im Verbrennungsraum entstandenen Calciumoxids in Calciumhydroxid und zur ersten Bildung wasserhaltiger Sulfatphasen aus Calciumsulfat. Weiterhin finden im Wasserbad Lösungsreaktionen der leicht löslichen Salze statt, vor allem im Bereich der Chloride und Sulfate [PFRANG-STOTZ 1996].

Die Rohschlacke, die den Entschlacker verlässt, ist kein inertes Produkt, sondern unterliegt komplexen Wechselwirkungen mit der Umgebungsatmosphäre und weiteren inneren chemischen und mineralogischen Umwandlungen. [PFRANG-STOTZ 1996] [KNORR 1999]. Die meisten Reaktionen finden in den ersten Stunden bzw. bei der Alterung innerhalb weniger Wochen statt. [GERVEN 2005] [CHIMENOS 2003].

Bei der Zwischenlagerung im Schlackebunker, beim weiteren Handling sowie bei der endgültigen Lagerung der Schlacken lagert sich das in der Schlacke befindliche Wasser weiter an die verschiedenen Bestandteile an. Durch den zusätzlichen Kontakt mit der Umgebungsluft beginnen verschiedene chemische Reaktionen, die eine große Bedeutung hinsichtlich der Verfestigungs-, Raumbeständigkeits- und Reaktivitätseigenschaften der Schlacken nach dem Alterungsprozess haben [PFRANG-STOTZ 1996] [PFRANG-STOTZ 2005] [KNORR 1999] [HIRSCHMANN 1997] [BAYLFU 2002].

Die Carbonatisierung ist eine dieser chemischen Reaktionen, bei der gebildetes Calciumhydroxid mit dem Kohlendioxid aus der Umgebungsluft zu Carbonatphasen, vorwiegend Calciumcarbonat reagiert. Dieser Vorgang ist vor allem für die Stabilität der Schlacke

verantwortlich, da das Calciumcarbonat in der Feinfraktion als Bindemittel und auf die weiteren Schlackebestandteile verfestigend wirkt [PFRANG-STOTZ 2005].

Zusätzlich bewirkt die Carbonatisierung eine Zunahme des anorganischen Gesamtkohlenstoffgehaltes (TIC) und eine pH-Wert- Abnahme von 1-3 Einheiten [PFRANG-STOTZ 2005] [GERVEN 2005] [KÖSTER 2002]. Weiterhin kann es bei Anwesenheit von Calciumhydroxid zur Bildung von Calciumsilikathydraten und bei Anwesenheit von Aluminium zu Calciumaluminathydraten kommen [KNORR 1999]. Calciumsilikat- und Calciumaluminathydrate besitzen eine hohe Sorptionsfähigkeit gegenüber Schwermetallen [Kersten 1996] und können somit Beiträge zur Schadstoffimmobilisierung leisten. Eine spätere Veränderung dieser Sekundärphasen kann jedoch zu einer Freisetzung der Schadstoffe führen [KNORR 1999]. Die Haupteinflussgrößen auf die verschiedenen Carbonatisierungsreaktionen ist die angebotene Menge an CO₂ aus der Umgebungsluft, der Wassergehalt der Schlacken sowie die Intensität des Gas-/ Feststoffkontakts [PFRANG-STOTZ 2005].

Neben der Carbonatisierung stellen Sulfatreaktionen weitere wichtige chemische Vorgänge für die Alterung von Schlacken dar. Bei den Sulfatreaktionen löst sich zum einen das Calciumsulfat in den Porenwässern und wird abtransportiert. Zum anderen bilden sich neue wasserhaltige Sulfatphasen wie das Hemihydrat Bassanit oder direkt Gips. Weiterhin kommt es durch den Anstieg der Sulfatkonzentration in den Porenwässern bei Kontakt mit Aluminiumverbindungen zur Bildung von Calciumaluminatphasen, vorwiegend Ettringit. Die Umwandlungen in die verschiedenen Sulfatphasen sind meist mit Volumenänderungen verbunden, so dass die Sulfatreaktionen in erster Linie für die Raumbeständigkeit der Schlacke verantwortlich sind [PFRANG-STOTZ 2005] [BAYLFU 2002].

Metallisches Eisen korrodiert während der Alterung zu Oxiden und Hydroxiden und verteilt sich langsam über den Porenraum der Schlacke, wo es als Adsorptionspartner für Schwermetalle zur Verfügung steht [LICHTENSTEIGER 1994] [KERSTEN 1996].

Die genannten Alterungsvorgänge sind erheblichen Schwankungen ausgesetzt, die auf die Heterogenität der Schlacke zurückzuführen sind. Je nach Reaktivität und räumlicher Anordnung kristalliner und amorpher Phasen können sie innerhalb weniger Wochen bis zu tausenden von Jahren ablaufen [KNORR 1999]. Der Umbau des Phasenbestandes wird meist von einem Anstieg des Glühverlustes und des TIC auf Grund der Einbindung von CO₂ begleitet [HENTSCHEL 1999]. Dies ist auch mit einer Zunahme der spezifischen Oberfläche verbunden [HENTSCHEL 1999]. Glühverlust, TIC und die spezifische Oberfläche können mit relativ geringem Aufwand bestimmt werden und für eine Charakterisierung des Alterungsverlaufs herangezogen werden [KNORR 1999].

Ferner können die Alterungsprozesse in der Schlacke durch zusätzliche Maßnahmen beschleunigt werden. Eine künstliche Bewässerung oder eine Lagerung im Freien führt bei Niederschlägen zu einer erhöhten Auswaschung von leichtlöslichen Salzen, bevorzugt Kalium- und Natriumchlorid, und damit zu einer deutlichen Verringerung der Kalium-, Natrium-, und Chloridgehalte in der Schlacke [KNORR 1999] [HENTSCHEL 1999]. Durch die Bewässerung wurde auch ein Anstieg der Reaktionsgeschwindigkeiten nachgewiesen [HENTSCHEL 1999]. Hentschel erkannte eine Beschleunigung des Alterungsverhaltens durch eine zweiwöchige Lagerung der Schlacke im Schlackebunker [HENTSCHEL 1999].

Eine weitere Möglichkeit, die chemischen Vorgänge und damit die Alterungsprozesse zu beschleunigen, besteht durch eine gezielte Begasung der Schlacke mit CO₂. Dadurch laufen die Carbonatisierungsreaktionen und damit die Bildung des Calciumcarbonates schneller ab. Eine übermäßige CO₂- Zufuhr begünstigt die Bildung von Hydrogencarbonaten, wodurch sich der Gesamtgehalt an anorganischen Kohlenstoff (TIC) verdoppeln kann. Durch die Bildung der Hydrogencarbonate steigt jedoch auch die Calciumlöslichkeit wieder an, was zu einer Verschiebung der Pufferkapazität vom basischen in den leicht sauren Bereich führen kann

[HUBER 1996]. Dies hat Auswirkungen auf die Mobilität der Schwermetalle, die im folgenden Abschnitt näher erklärt wird.

6.7 Elutionsverhalten

Für die Auswahl eines Entsorgungsweges der Schlacke ist neben der chemischen Zusammensetzung die Frage zu klären, in welchem Umfang die in der Schlacke aufkonzentrierten Schadstoffe mobilisiert und damit in der Umwelt verteilt werden können. Im Mittelpunkt steht hier die Freisetzung durch die Einwirkung von Sicker- oder Grundwässern sowie von Niederschlägen. Für Aussagen über die Mobilität von Schlackeeinhaltsstoffen beim Kontakt mit Wasser wird in entsprechenden Rechtsvorschriften bzw. bei Genehmigungen durch die Behörden die Durchführung genormter Elutionstests gefordert.

In Deutschland wurde in der Vergangenheit das sogenannte DEV-S4- Verfahren angewendet. Dieser Eluattest war ursprünglich Bestandteil der "Deutschen Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung, Gruppe S Schlamm und Sedimente", kurz DEV S4. In einer überarbeiteten Fassung wurde der Test zur „Bestimmung der Eluierbarkeit mit Wasser“ 1984 als Deutsche Norm DIN 38414 Teil 4 [DIN 38414-4] übernommen und seit dem auch für feste, pastöse und schlammige Materialien angewendet.

Beim Elutionstest nach DEV S4 werden die Proben 24 Stunden in destilliertem Wasser langsam über Kopf gedreht oder geschüttelt, wobei das Flüssigkeits-/Feststoffverhältnis L/S 10 beträgt. Die Probe soll dauernd in Bewegung bleiben, ohne dabei z.B. durch Abrieb weiter zerkleinert zu werden. Falls das erhaltene Eluat nicht völlig klar ist, muss es über einen Membranfilter mit der Porenweite 0,45 µm filtriert werden. Die genaue Beschreibung des Verfahrens und möglicher Varianten findet man in [DIN 38414-4].

Das DEV S4-Verfahren ist relativ einfach und schnell durchführbar. Ein besonderer Vorteil des DEV S4-Tests ist, dass in der zu untersuchenden Matrix keine tiefgreifenden chemischen Veränderungen hervorgerufen werden [WIMMER 2001].

Jedoch ist umstritten, inwieweit Auslauguntersuchungen nach dem DEV S4-Verfahren die natürlichen Vorgänge tatsächlich simulieren. Bei der Bewertung der Ergebnisse müssen in jedem Fall die Unterschiede zwischen Laboruntersuchungen und den realen Bedingungen (System, Elutionsmittel, Elutionsdauer, L/S-Verhältnis, Bewegung, Klimaschwankung, biologische Prozesse) berücksichtigt werden. [WIMMER 2001]

In den anderen europäischen Ländern sind ebenfalls eigene Testverfahren entwickelt worden, die sich zum Teil stark vom DEV S4-Test unterscheiden. Ein Vergleich der Ergebnisse von diesen verschiedenen Testverfahren ist nicht möglich.

Deshalb werden derzeit die länderspezifischen Verfahren durch die europaweit normierten Elutionstests der vierteiligen EN 12457 zur "Charakterisierung von Abfällen - Auslaugung; Übereinstimmungsuntersuchung für die Auslaugung von körnigen Abfällen und Schlämmen" ersetzt. Von dieser europäischen Norm wurde der 4. Teil, das "Einstufige Schüttelverfahren mit einem Flüssigkeits-/Feststoffverhältnis von 10 l/kg für Materialien mit einer Korngröße unter 10 mm (ohne oder mit Korngrößenreduzierung)", als DIN EN 12457-4 [DIN EN 12457-4] in die Vorschriften der AbfAbIV übernommen.

Bei der Elution von Schlacke ist der pH- Wert, die elektrische Leitfähigkeit sowie die Konzentration von anorganischen Salzen und Schwermetallen von Bedeutung.

Die Elution von Schwermetallen wird wesentlich durch die Beschaffenheit der Matrix der Schlacke bestimmt, d.h. durch die Gehalte an Hauptkomponenten und deren Bindungsformen mit den Schwermetallen. Der Gesamtgehalt der Schwermetalle im Feststoff hat dagegen für das Testergebnis nach DEV S4 eine geringere Bedeutung [KNORR 1999] [KÖSTER 2002] [PFRANG-STOTZ 2005].

Weiterhin hängt die Eluierbarkeit von Schwermetallen sehr stark von den Eigenschaften des Elutionsmittels und insbesondere dessen pH-Wert ab, da sie im Wesentlichen durch die Löslichkeit von Metallsilikaten, -hydroxiden und -oxiden bestimmt wird [KÖSTER 2002] [KORR 1999]. Amphotere Metalle wie Blei lösen sich besonders gut im alkalischen Bereich bei einem pH-Wert von 12- 12,5. Im schwach alkalischen Bereich sinkt die Löslichkeit aller Schwermetalle auf ein Minimum herab. Im neutralen Bereich bei pH 7 bis 8 sind dagegen Metallanionen wie Chromate oder Molybdate leicht auswaschbar. In sauren Medien lösen sich schließlich die meisten Metalloxide [KÖSTER 2002]. Die Löslichkeit anderer Schwermetalle ist auch von der chem. Zusammensetzung der wässrigen Phase abhängig. Cadmium geht beispielsweise im chloridhaltigen Medium als Komplex in Lösung [KÖSTER 2002].

Rohschlacke aus dem Entschlacker weist in der Regel einen pH- Wert im alkalischen Bereich von pH 12 bis 13 auf. Bei diesem pH-Wert lösen sich die mobilen Bleiverbindungen sehr gut. Während der von der LAGA empfohlenen Lagerungszeit von 3 Monaten sinkt der pH- Wert in Folge der Carbonatbildung um 1-3 Einheiten. Die Carbonate fungieren in der Schlacke als basischer Puffer und halten den pH- Wert der Schlacke im alkalischen Bereich. Dabei verringert sich die el. Leitfähigkeit im Eluat signifikant, hauptsächlich auf Grund von Mineralneubildungen und Auswaschungsvorgängen [PFRANG-STOTZ 2005].

Außerdem kommt es während der Lagerung durch die Bildung von löslichen wasserhaltigen Sulfatphasen wie Gips zu einem erhöhten Sulfatgehalt im Eluat [PFRANG-STOTZ 2005]. Bei sinkendem pH-Wert werden Blei und Zink im Kristallgitter des Calciumcarbonats eingebaut. Dadurch nimmt deren Eluatkonzentrationen deutlich ab [PFRANG-STOTZ 2005]. Für alle anderen Schwermetalle wurde nach einer dreimonatigen Lagerung keine signifikante Verbesserung der Elutionsstabilität gefunden.

Unterschiedliche Korngrößenklassen zeigen ein differenziertes Elutionsverhalten insbesondere die Feinfraktion (<2 mm) ist durch eine geringere Elutionsstabilität für Schwermetalle charakterisiert. Daher kann eine Abtrennung dieser Kornklasse zu einer deutlichen Verringerung der Schwermetallkonzentration im Eluat beitragen [KNORR 1999].

Unter natürlichen Bedingungen bei einer Verwertung in Baumaßnahmen oder einer Deponierung hängt die Schwermetallmobilität neben dem pH- Wert und der chemischen Zusammensetzung des Sickerwassers auch wesentlich von den zugänglichen Kornoberflächen ab [KNORR 1999] [HENTSCHEL 1999].

6.8 Langzeitverhalten

Die Veränderungen des pH-Wertes bei der Alterung bestimmen langfristig das Emissionsverhalten von abgelagerten Schlacken [HUBER 1996]. In umfangreichen Untersuchungen wurde festgestellt, dass sich der pH-Wert weder durch sauren Regen noch durch Prozesse wie dem Säureeintrag durch mikrobiellen Abbau oder Oxidation von Sulfiden maßgeblich verringert [HUBER 1996] [HIRSCHMANN 1999].

Die Auswaschung von Hydroxiden und Carbonaten bewirkt eine Verringerung der Pufferkapazität. Dadurch kann sich im Zeitraum von Jahren bis Jahrtausenden der pH- Wert so weit absenken, dass mit einer erhöhten Schwermetalllöslichkeit zu rechnen ist [HUBER 1996] [HIRSCHMANN 1999]. Bis dahin verhindert vor allem die Einbindung der Schwermetalle in Sekundärphasen eine Freisetzung bis pH 7 [HIRSCHMANN 1999].

Die Zeitdauer der Abnahme der Pufferkapazität hängt einerseits von den Umweltbedingungen, d.h. Wasserhaushalt und Säuregrad des Regens ab. Des Weiteren haben die Einbaubedingungen der Schlacke einen großen Einfluss auf die Elution. Dazu gehören Mächtigkeit, Grad der Verdichtung, Durchlässigkeit und Art der Abdeckung.

Huber [HUBER 1996] fand heraus, dass eine Verfestigung der Schlacke den Porenraum verringert und damit die Pufferkapazität um 60 % erhöht, da die Auswaschung stark gehemmt ist. Dadurch kann langfristig die Absenkung des pH-Wertes verhindert und damit einem erhöhten Schwermetallaustrag vorgebeugt werden.

7 Material und Methoden

In den folgenden Abschnitten werden zunächst die Methoden der Datenerhebung und die Herkunft der unterschiedlichen Daten beschrieben. Weiterhin werden die im Rahmen der Auswertung verwendeten Begriffe und statistischen Ansätze vorgestellt und erklärt. Ergänzend wird die Vorgehensweise bei der Auswertung von Literaturdaten für diese Arbeit verdeutlicht.

7.1 Datenerhebungsmethoden

Ein wichtiger Beitrag zu der vorliegenden Arbeit bestand in der Datenerhebung direkt bei den Betreibern von deutschen Abfallverbrennungsanlagen. Hierzu wurde ein Fragebogen konzipiert und an 61 Anlagen verschickt. Relativ neue Anlagen bzw. Anlagen in der Inbetriebnahme wurden nicht berücksichtigt.

Mit dem Fragebogen wurden bei jeder Anlage Brennstoffdaten, die Anlagenspezifikationen, das aktuelle Schlackeaufkommen, die Beschaffenheit und Elutionseigenschaften der Schlacke, deren Beseitigungs- und/oder Verwertungswege und die Entsorgungskosten abgefragt. Der vollständige Fragebogen ist im Anhang zu finden.

Um einen möglichst hohen Rücklauf bei der Umfrage zu erreichen wurde vor dem Versand der Fragebögen telefonisch ein persönlicher Kontakt mit den zuständigen Bearbeitern hergestellt. In diesen zeitintensiven Gesprächen wurde das Anliegen geschildert und die Bereitschaft zur Beantwortung des Fragebogens geklärt.

Bedauerlicherweise zeigte ein Großteil der Anlagenbetreiber wenig Interesse an einer umfangreichen Datenerhebung mitzuwirken. Als Grund wurde die sehr häufige Durchführung von Datenerhebungen auf diesem Weg genannt, die nicht ins Geschäftsfeld der Anlagenbetreiber und -mitarbeiter fällt. Auf der anderen Seite standen einige Anlagenbetreiber dem Anliegen dieser Arbeit sehr aufgeschlossen gegenüber, und es wurden freundlicherweise deutlich mehr Informationen als angefragt zu Verfügung gestellt. Abbildung 12 gibt einen Überblick über den Rücklauf der Umfrage.

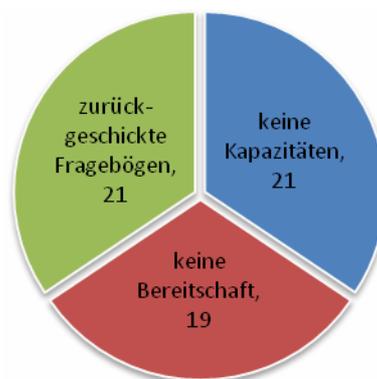


Abbildung 12: Verteilung der Antworten bei der Umfrage

Von den 61 verschickten Fragebögen kam während der Bearbeitungszeit etwa ein Drittel ausgefüllt zurück. Bei 21 der angeschriebenen Anlagen wurde eine Teilnahme aufgrund fehlender personeller Kapazitäten abgelehnt. Der restliche Anteil zeigte keine Bereitschaft zur Teilnahme an der Umfrage. Als Gründe wurden Verstöße gegen die Firmenpolitik, der zu große Umfang und/oder Detailliertheit des Fragebogens und die Problematik des Themas genannt.

Im Rahmen der Datenerhebung mit dem Fragebogen entstand der Kontakt mit der Interessengemeinschaft der thermischen Abfallbehandlungsanlagen in Deutschland e.V. (ITAD). Von dort wurden lediglich Daten zum allgemeinen Schlackeaufkommen aus der Abfallverbrennung zur Verfügung gestellt. Detaillierte Angaben zur Feststoffzusammensetzung oder zum Eluatverhalten entsprechend dem Umfang des Fragebogens waren nicht verfügbar.

Neben der Datenerhebung auf Basis der Fragebogenaktion wurden weitere Wege zur Informationsbeschaffung genutzt. In einer Literaturrecherche wurden etwa 150 Veröffentlichungen der letzten 20 Jahre ausgewertet. Aus einigen Publikationen konnten Datensätze mit Konzentrationsangaben von Inhaltsstoffen im Feststoff und Eluat erstellt werden. Es wurde darauf geachtet, dass nur Daten deutscher MVA berücksichtigt wurden.

Als dritte Datenquelle konnten umfangreiche Daten aus einem Forschungsprojekt des Forschungszentrums Karlsruhe verwendet werden. Von Frau Dr. Pfrang-Stotz und Herrn Dr. Reichelt wurden die Schlacken von 10 deutschen Müllverbrennungsanlagen mit unterschiedlicher Verfahrenstechnik untersucht und hinsichtlich der Beschaffenheit bei unterschiedlichen Müllzusammensetzungen beurteilt. Die Ergebnisse des Forschungsprojekts wurden in der Reihe "Wissenschaftlichen Berichte" des Forschungszentrums Karlsruhe mit Titel "Einfluss geänderter Stoffströme in der Abfallwirtschaft auf die zukünftige Qualität und die Verwertungsmöglichkeiten von Müllverbrennungsschlacken" ([PFRANG-STOTZ 2005]) publiziert. Für die vorliegende Arbeit wurden die entsprechenden Messergebnisse von Feststoff- und Eluatparametern von Frau Dr. Pfrang-Stotz und Herrn Dr. Reichelt freundlicherweise in detaillierter Form zur Verfügung gestellt. Folglich konnten diese Daten für einen Vergleich mit den Informationen aus der Umfrage und der eigenen Literaturrecherche herangezogen und in den Abbildungen dargestellt werden.

Im Rahmen der eigenen Recherchen wurden auch einige Landes- und Umweltämter kontaktiert und um Auskunft über Eluat- und Feststoffparameter von Schlacken gebeten. Bei diesen Behörden müssen die Betreiber der Müllverbrennungsanlagen regelmäßig Auskunft über die in ihren Genehmigungsbescheiden geforderten Parameter geben. Dieser Weg der Informationsbeschaffung erwies sich als sehr zeitaufwendig. Eine besondere Schwierigkeit bestand darin, die zuständigen Behördenstellen zu ermitteln, die für die entsprechenden Daten auskunftsberechtigt sind.

Im Rahmen dieser Arbeit konnte nur bei einer Behörde eine Akteneinsicht vorgenommen werden. Die gewonnenen Daten wurden in die Datenbasis der Umfragewerte eingepflegt.

Als weitere Informationsquelle wurden einige Dienstleister zur Entsorgung, Aufbereitung oder Verwertung von Schlacken kontaktiert und um Auskunft über die benötigten Daten in Form eines weiteren Fragebogens gebeten. Auch bei dieser Befragung war die Bereitschaft zur Mitarbeit sehr beschränkt.

Weiterhin wurde versucht über die Abfallanalydatenbank (ABANDA) des Landes Nordrhein- Westfalen aktuelle Daten über Schlacken zu beziehen. ABANDA ist ein Instrument zur Abfallbewertung für die Abfallwirtschaftsbehörden des Landes und ist im Internet frei zugänglich. Die dort angegebenen Analysendaten für Schlacken konnten jedoch nicht eindeutig den Schlacken aus der Abfallverbrennung zugeordnet werden, da es sich auf Grund der nicht eindeutigen Bezeichnungen auch um Schlacken anderer Industriezweige

handeln konnte. Außerdem könnten auch andere Rückstände aus der Abfallverbrennung wie Flugaschen berücksichtigt worden sein.

7.2 Auswertestrategien

Zur Auswertung und Interpretation der Daten sind verschiedene statistische Methoden verwendet worden:

Die **Bestimmungsgrenze** gibt die geringste Konzentration eines Stoffes an, die sich mit einer festgelegten Untersuchungsmethode quantitativ bestimmen lässt. Im Gegensatz dazu ist die Nachweisgrenze als die geringste qualitativ von null verschiedene (signifikant aus dem Grundrauschen herausragende) Konzentration definiert. Liegt eine Elementkonzentration zwischen Nachweis- und Bestimmungsgrenze, kann dieses Element zwar qualitativ nachgewiesen werden, die tatsächliche Konzentration kann jedoch nicht innerhalb der analytischen Genauigkeit bestimmt werden. Eine genaue Definition von Bestimmungsgrenze und Nachweisgrenze ist in der DIN 32645 „Chemische Analytik; Nachweis-, Erfassungs- und Bestimmungsgrenze; Ermittlung unter Wiederholbedingungen; Begriffe, Verfahren, Auswertung“ [DIN 32645] angegeben.

Sind Werte als Bestimmungsgrenze angegeben (meist mit einem „<“) können sie nicht mit in die statistische Auswertung einfließen, da sie keine eindeutigen Zahlenwerte darstellen. Deshalb müssen Ersatzwerte verwendet werden. Das Problem besteht darin, wie diese zu wählen sind, da die Wahrscheinlichkeit für einen Ersatzwert zwischen Null und Bestimmungsgrenze gleich ist. Es gibt dafür bisher auch kein einheitliches Verfahren wie solche Ersatzwerte erstellt werden. Deshalb wurde in dieser Arbeit zur Veranschaulichung der Ersatzwert gleich der Bestimmungsgrenze gewählt.

Minimum und Maximum stellen die Extremwerte einer Stichprobe dar. In dieser Arbeit wurden sie nicht selbst gebildet sondern aus der Literatur übernommen und jeweils untereinander oder mit anderen Extremwerten und Schwankungsbreiten verglichen.

Das **arithmetische Mittel** wird auch als Durchschnitt bezeichnet und ist ein rechnerisch bestimmter Mittelwert, der den Durchschnittswert aller Werte eines Datensatzes angibt. Das arithmetische Mittel ist wie folgt definiert:

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n}$$

Der **Median**, auch als Zentralwert bezeichnet, stellt die Grenze zwischen zwei Hälften dar. Ordnet man alle Zahlen einer Stichprobe der Größe nach in aufsteigender Weise, so stellt der Wert in der Mitte der Zahlenreihe den Median dar. Das bedeutet, die eine Hälfte der Zahlen hat Werte, die kleiner sind als der Median und die andere Hälfte der Zahlen hat Werte, die größer sind als der Median. Bei einer geraden Anzahl von Zahlen ist der Median als das arithmetische Mittel der beiden in der Mitte stehenden Werte definiert. Der Median hat gegenüber dem arithmetischen Mittel den Vorteil, robuster gegenüber Ausreißern zu sein, d.h. Werten die extrem abweichen.

Außerdem sind Anmerkungen zu den **Literaturdaten** erforderlich. Hier ist zunächst zu berücksichtigen, dass die Literaturdaten teilweise von einer Anlage stammen oder von mehreren Anlagen zusammengefasst wurden.

Aufgrund des sehr inhomogenen Brennstoffs kommt bei Untersuchungen an Schlacken aus der Abfallverbrennung der Probenahme und der anschließenden Probenaufbereitung eine besondere Bedeutung zu. In der Regel fehlen in der Literatur Hinweise zu diesem Bereich.

Zu den publizierten Konzentrationswerten der chemischen Schlackezusammensetzung oder den ermittelten Eluatwerten gibt es oft keine detaillierten Informationen über Alterungsdauer oder angewandte Aufbereitungsverfahren. Für die Auswertung wurden nur Daten herangezogen, für die nachvollziehbare Informationen über Alterung bzw. Aufbereitung zur Verfügung standen. Bei den Eluatwerten mussten zum Beispiel die Daten in Werte für Rohschlacken und Werte für abgelagerte Schlacken geordnet werden. Diese Unterteilung ist bei den Feststoffwerten nicht relevant, denn durch die Auswaschvorgänge kommt es zu keiner signifikanten Veränderung bei der elementaren Zusammensetzung der Schlacken.

Weiterhin wurden in der Literatur für die Konzentrationen der einzelnen Parameter in Feststoff und Eluat Werte für die Fein- und die Grobfraktion und Werte für die gesamte Schlacke angegeben. Bei diesen Daten musste außerdem zwischen Minimum-, Maximum-, Median- und Mittelwerten unterschieden werden. Einige Literaturwerte gaben den Gehalt von Einzelproben bzw. -analysen wieder, andere wurden aus Mischproben bzw. Tages- oder Wochenproben gewonnen oder aus Sammelproben über einen gesamten Untersuchungszeitraum. Diese Unterscheidungen wurden jedoch nicht berücksichtigt, da sie bei der Untersuchung von Größenordnungen bzw. von Schwankungsbreiten wenig Relevanz besaßen und die Datensätze zu stark verringert hätten. Das Nebeneinander von gemittelten und einzeln analysierten Probedaten hat auch den Vorteil, dass bei der Ermittlung von Schwankungsbreiten neben dem Durchschnitt mögliche Extremwerte abgebildet werden und somit ein realistisches Gesamtbild entsteht.

8 Datenauswertung

In diesem Kapitel werden die gesammelten Daten aus der Umfrage und der Literatur sowie die von Frau Dr. Pfrang-Stotz und Herrn Dr. Reichelt aus [PFRANG-STOTZ 2005] zur Verfügung gestellten Daten ausgewertet.

In den folgenden Abschnitten werden die Aspekte Schlackeaufkommen, chemische Zusammensetzung, Elutionsverhalten, Einfluss der Müllqualität und der Einfluss der Feuerungstechnik betrachtet.

8.1 Daten zum Schlackeaufkommen

Zur Ermittlung des aktuellen Schlackeaufkommens aus der thermischen Behandlung von Siedlungsabfällen in Deutschland wurde in der eigenen Umfrage bei den MVA- Betreibern das aktuelle Schlackeaufkommen abgefragt. Entsprechende Informationen wurden von insgesamt 20 Betreibern mitgeteilt und sind in Tabelle 6 dargestellt. Mit der Angabe über den aktuellen Abfalldurchsatz konnte das spezifische Schlackeaufkommen, Schlacke pro Tonne verbrannten Abfall, für jede Anlage berechnet werden.

Nach Tabelle 6 schwankt das spezifische Schlackeaufkommen zwischen 167 und 333 kg/t. Der Durchschnitt liegt bei ca. 250 kg/t. Damit lässt sich für die derzeit 72 in Deutschland existierenden MVA mit einer Gesamtkapazität von 17,8 Millionen Tonnen Abfall [BMU 2005] für 2007 ein gesamtes Schlackeaufkommen von 4,5 Millionen t/a abschätzen.

Tabelle 6: Abfalldurchsatz, Schlackeanfall und berechnetes spez. Schlackeaufkommen (Daten aus eigener Umfrage bei deutschen MVA)

Anlagen- Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	20	21	Summe
Abfalldurchsatz [t/h]	74	32	32	11	41	43	30	10	40	30	72	16	30	15	12	11	96	30	96	30	751
Schlackeanfall [t/h]	12,5	10	7	2,2	11	10,8	6,4	2,5	12,3	7,4	12	3,9	7,9	4	2,7	2,8	23	9,3	26,2	10	183,9
spezifischer Schlackeanfall [kg/t]																					Ø
	170	312	219	200	268	251	213	250	308	247	167	238	263	267	225	255	240	310	273	333	250,5

Eine Übersicht der Daten zum durchschnittlichen spezifischen Schlackeaufkommen in den letzten 10 Jahren zeigt Abbildung 13. Die Werte für 1997, 1999 und 2001 wurden im Rahmen einer wiederholt durchgeführten Datenerhebung [KRASS 1999] [KRASS 2002] [KRASS 2004] bei deutschen Müllverbrennungsanlagen zum Anfall sowie zu den Beseitigungs- und Verwertungsmengen ermittelt. Zur bundesweiten Menge an verbranntem Abfall und der angefallenen Menge an Rohschlacken konnte für 2005 der durchschnittliche spez. Anfall aus Angaben im [EUWID 11 2007] berechnet werden.

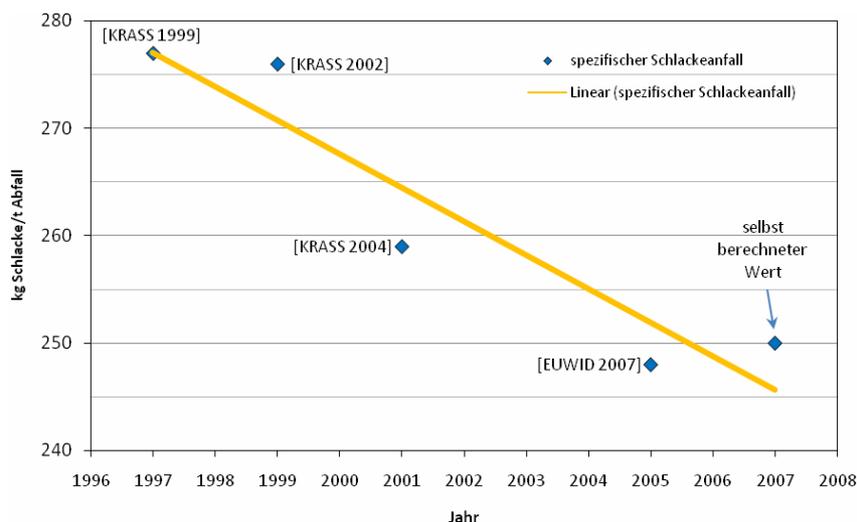


Abbildung 13: Spezifisches Schlackeaufkommen der letzten 10 Jahre (Erläuterungen im Text)

Die Trendlinie im Diagramm zeigt eine leichte Abnahme des spezifischen Schlackeaufkommens in den letzten 10 Jahren um ca. 3 kg pro Jahr; heute fallen pro Tonne verbrannten Abfall 27 kg weniger Schlacke an als noch vor 10 Jahren.

Diese Feststellung ist hauptsächlich auf Veränderungen in der Abfallzusammensetzung, begründet durch verstärkte Recyclingmaßnahmen, zurückzuführen. Der Vergleich der Abfallzusammensetzung 1985 [KOZMIENSKY 1994] mit 1998 bis 2002 [WEIGAND 2005] in Abbildung 14 zeigt, dass die Anteile an Glas, Metallen und Organik gesunken sind, während, abgesehen von Papier, die heizwertreichen Abfallgruppen wie Hygieneprodukte, Kunststoffe, Textilien usw. höhere Anteile bilden.

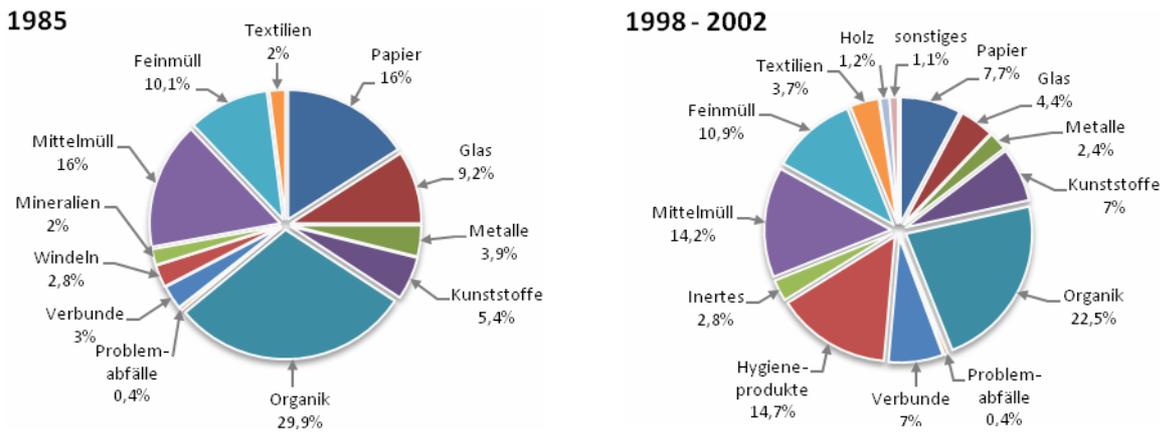


Abbildung 14: Vergleich der Siedlungsabfallzusammensetzung 1985 [KOZMIENSKY 1994] und 1998 bis 2002 [WEIGAND 2005]

8.2 Daten zur chemischen Zusammensetzung von Schlacke

Für Aussagen zur chemischen Zusammensetzung der Schlacke aus der Abfallverbrennung wurden die Daten aus der eigenen Betreiberumfrage, aus der Literatur und die von Pfrang-Stotz zur Verfügung gestellten Datensätze ausgewertet.

Zur Charakterisierung der Schlacken in deutschen Müllverbrennungsanlagen machte lediglich ein Betreiber Angaben zur chemischen Zusammensetzung der schrottfreien Schlacke. Insgesamt 18 Anlagen teilten Informationen über umweltrelevante Feststoffparameter mit. Diese Angaben wurden in sehr verschiedenem Umfang zur Verfügung gestellt. Zu den umweltrelevanten Feststoffparametern lagen beispielsweise aus 4 der 18 Anlagen nur Werte für TOC und Glühverlust der Schlacken vor. Der Grund dafür ist, dass sich die von den Anlagenbetreibern durchgeführten Untersuchungen in der Regel auf die in den Genehmigungsbescheiden bzw. von den Aufbereitungsbetrieben geforderten Parameter beschränken.

Alle angegebenen Daten für die Schlacke beziehen sich stets auf die Trockenmasse.

8.2.1 Hauptbestandteile von Schlacken aus der Abfallverbrennung

Zu den Hauptbestandteilen gehören u. a. die chemischen Elemente Silizium, Aluminium, Eisen und Aluminium; sie bestimmen maßgeblich den Aufbau der unterschiedlichen Mineralphasen der Schlacke (Siehe Abschnitt 6.2).

Da in der Umfrage keine auswertbaren Angaben über den Gehalt an Hauptbestandteilen gewonnen werden konnten, wurden die einzelnen Konzentrationen der Hauptelemente in der Literatur recherchiert. Dort findet man Angaben zu Mittelwerten und zu Schwankungsbreiten der einzelnen Elemente.

Aus den einzelnen Literaturwerten wurde das arithmetische Mittel berechnet und in den Abbildungen mit dargestellt. Zum Vergleich wurden die von Reimann [REIMANN 1996] ermittelten Schwankungsbreiten berücksichtigt, die bereits in Abschnitt 6.2 erwähnt wurden.

Abbildung 15 zeigt die Bandbreite der Literaturangaben über Mittelwerte der Matrix bildenden Hauptelemente in g/kg. Hinter der Elementbezeichnung sind in Klammern jeweils die Anzahl der einfließenden Literaturstellen angegeben.

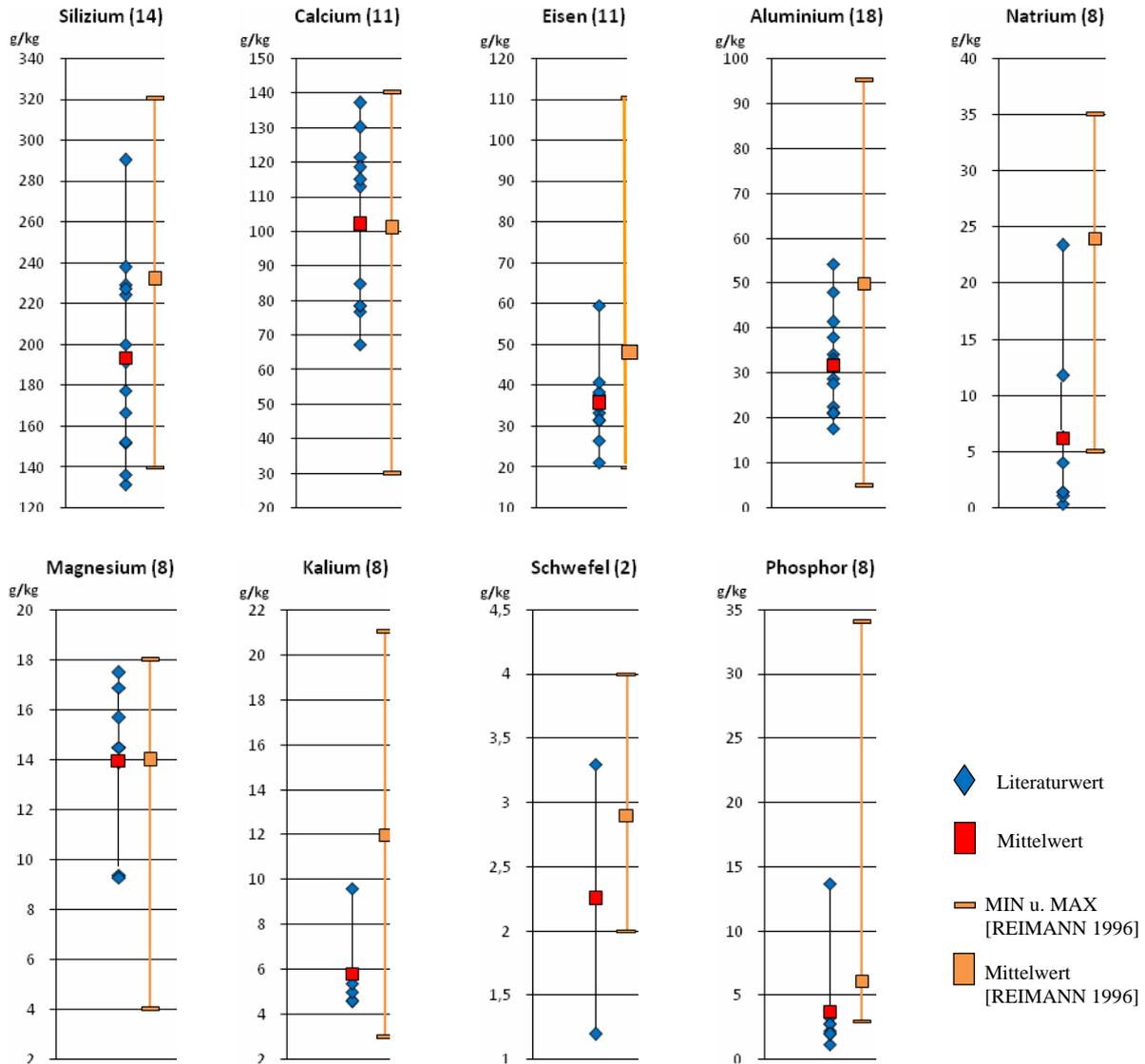


Abbildung 15: Schwankungsbreiten für die Konzentrationen der Hauptkomponenten von Schlacken (Literaturrecherche)

Nach Abbildung 15 bildet Silizium den mengenmäßig größten Anteil der Schlacken mit einem mittleren Gehalt von 194 g/kg und einem ermittelten Schwankungsbereich von 132 bis 290 g/kg. Einen etwa halb so großen Anteil zeigt Calcium mit einem mittleren Gehalt von 102 g/kg und einer Bandbreite zwischen 67 und 137 g/kg. Die Gehalte von Eisen (Mittelwert: 36 g/kg) und Aluminium (Mittelwert: 32 g/kg) schwanken etwa im Bereich zwischen 20 und 60 g/kg. Während die Konzentration von Magnesium zwischen 1 bis 2 % liegt, kommen Natrium, Kalium, Schwefel und Phosphor in Konzentrationen kleiner als 1 % in Schlacken vor.

Die Bandbreiten der Literaturwerte sind, abgesehen von Schwefel, nicht so groß, wie die aus [REIMANN 1996]. Die oberen Grenzen der Schwankungsbreiten liegen bei allen Elementen unter den in angegebenen Maxima. Bei den unteren Grenzen liegen die Konzentrationen aus der Literatur für Silizium, Natrium, Schwefel und Phosphor unter den Minimalwerten aus.

Ein Grund für die unterschiedlichen Bandbreiten liegt an der Art der berücksichtigten Werte. Während bei der Literaturlauswertung nur gemittelte Gehalte für die Hauptkomponenten der Schlacken berücksichtigt wurden, erfolgte in [REIMANN 1996] auch eine Berücksichtigung

von Extremwerten. Dies wirkt sich auch auf die mittleren Gehalte der Elemente aus. Aus den Literaturdaten wurden für Silizium, Eisen, Aluminium, Natrium, Kalium und Phosphor niedrigere mittlere Konzentrationen berechnet als von Reimann [REIMANN 1996]. Bei Calcium, Magnesium und Schwefel wurden dagegen fast identische Mittelwerte ermittelt.

Es ist zu beachten, dass im Einzelfall die Zusammensetzung der Schlacke auf Grund der Abhängigkeit von der Müllzusammensetzung von den mitgeteilten Werten abweichen kann.

Neben den durchschnittlichen Gesamtgehalten der Hauptelemente in Schlacken findet man in der Literatur auch Angaben über minimale und maximale Konzentrationen in der Grob- bzw. Feinfraktion. Hierbei war zu beachten, dass Grob- und Feinfraktion in der Literatur hinsichtlich der Korngrößen unterschiedlich definiert sind. Für die Feinfraktion werden Korngrößen unter 2, 4, 6 oder unter 10 mm bzw. für die Grobfraktion von 8 bis 32 mm oder 6 bis 40 mm angegeben.

Da eine Unterscheidung der Elementkonzentrationen nach den verschiedenen Kornklassen den Datensatz zu sehr verringert hätte, wurden alle Literaturdaten nur den allgemeinen Kategorien Grob- und Feinfraktion zugeordnet. Es werden in der Literatur generell mehr Daten zu den Hauptelementgehalten der Feinfraktion als für die Grobfraktion angegeben. Dies beruht auf dem Interesse an dieser Fraktion, da in der Feinfraktion tendenziell höhere Schadstoffkonzentrationen als in der Grobfraktion vorgefunden werden (Siehe Abschnitt 6.7).

Abbildung 16 stellt die Bandbreite der Literaturwerte für die minimalen und maximalen Gehalte der Hauptelemente jeweils in Grob- und Feinfraktion sowie die entsprechenden Mittel- und Medianwerte dar. In der Achsenbeschriftung unten sind in Klammern die Anzahl der einfließenden Literaturstellen angegeben.

In den Diagrammen in Abbildung 16 erkennt man bei einigen Hauptelementen deutliche Unterschiede zwischen beiden Fraktionen. Die Grobfraktion weist insbesondere bei Silizium und schwächer ausgeprägt für Eisen einen höheren Gehalt auf als die Feinfraktion. Die Konzentrationen von Calcium und Schwefel sind dagegen in der Feinfraktion deutlich erhöht, im Fall von Kalium und Magnesium liegen die Konzentrationen in der Feinfraktion geringfügig höher. Aluminium, Natrium und Phosphor verteilen sich in etwa gleich auf beide Fraktionen.

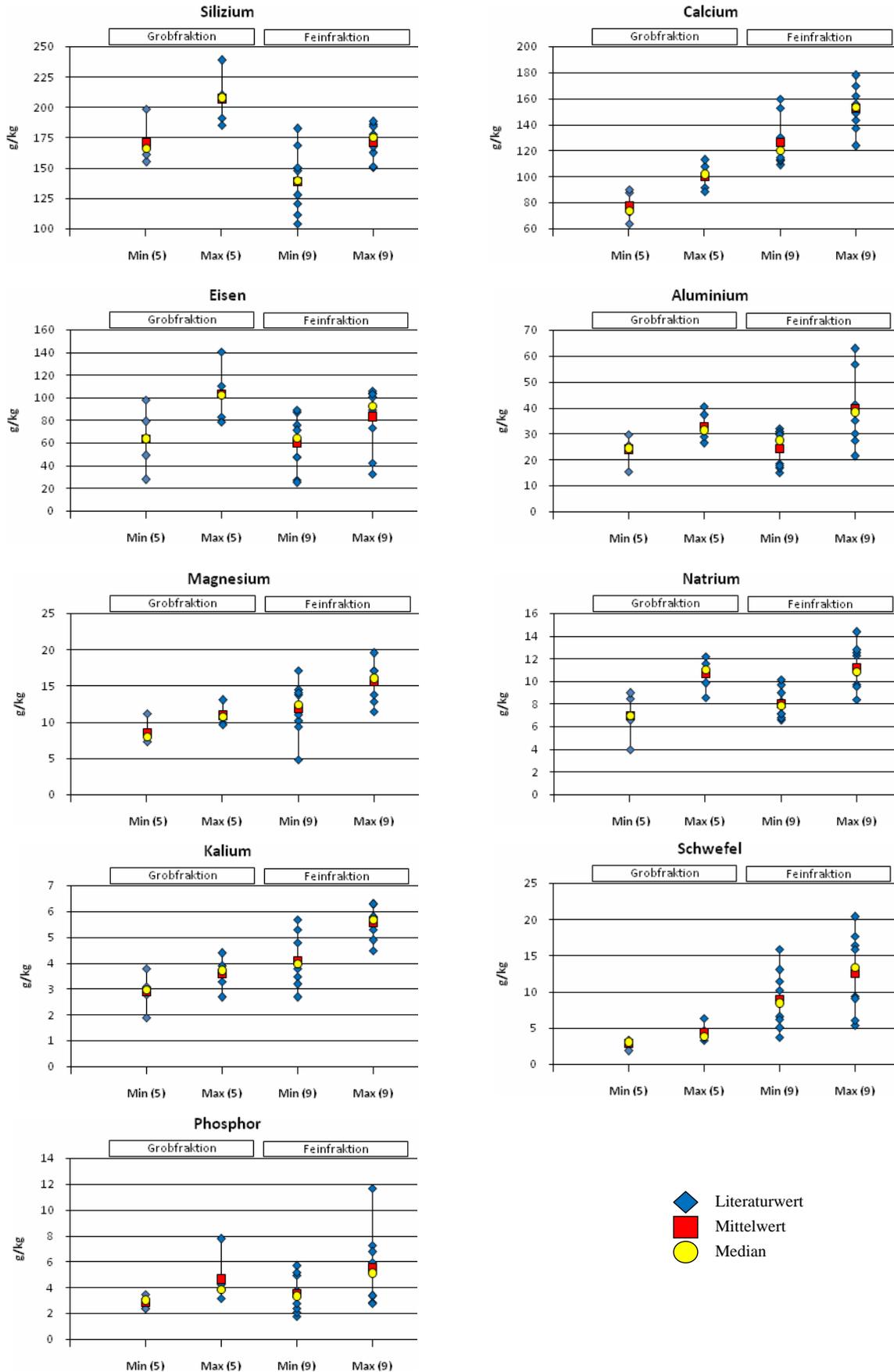


Abbildung 16: Vergleich der Minimal- und Maximalkonzentrationen der Hauptkomponenten in Schlacken für Grob- und Feinfraktion (Literaturrecherche)

8.2.2 Feststoffparameter nach LAGA

Für eine Verwertung von Schlacken bilden die Vorschriften der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) eine wesentliche Grundlage (Siehe Abschnitt 3.5). Um Aussagen über die Feststoffparameter in Bezug auf LAGA- Qualitätskriterien treffen zu können, wurden die Daten aus der Umfrage mit den Literaturwerten und den von Pfrang-Stotz [PFRANG-STOTZ 2005] zur Verfügung gestellten Daten verglichen. In der Auswertung wurden Rohschlacken und gealterte Schlacken getrennt berücksichtigt.

Die Werte für Rohschlacken wurden im Regelfall aus der Schlacke direkt nach dem Entschlacken einer MVA gewonnen. Die Werte aus der Umfrage für gealterte Schlacken wurden an Schlacken ermittelt, die in der Regel 3 Monate abgelagert und konventionell aufbereitet wurden. Nur die Werte aus der Literatur unterscheiden sich oftmals stark, hinsichtlich der Alterungsdauer der beprobten Schlacken. Die Daten umfassen Alterungsdauern von mehreren Wochen bis zu mehreren Jahren. Zu den Literaturwerten wurden oft keine Angaben über den Umfang der Aufbereitungsmaßnahmen gemacht.

Ferner war ein direkter Vergleich zwischen den Werten für Rohschlacken und gealterten Schlacken nur bei den Daten von Pfrang-Stotz möglich, da beide Werte aus einer Anlage stammen. Die Umfrage- und Literaturwerte sind dagegen aus völlig unterschiedlichen Anlagen.

In den folgenden Darstellungen wird erst auf die in der LAGA M19 [LAGA M19 1994] für eine Eignungsfeststellung von Rohschlacken zur Verwertung vorgeschriebenen Feststoffparameter (Siehe Abschnitt 3.5.1) und anschließend auf die in der LAGA M20 [LAGA M20 2004] für gealterte und entsprechend aufbereitete Schlacken vorgeschriebenen Feststoffparameter (siehe Abschnitt 3.5.2) eingegangen. Die jeweiligen empfohlenen Grenzwerte sind in den folgenden Abbildungen mit eingezeichnet.

Nach Tabelle 3 sollen die Rohschlacken bestimmte Werte für die Summenparameter EOX und Glühverlust, die Schwermetallgehalte und die Gehalte an Dioxinen und Furanen im Feststoff nicht überschreiten.

Im Rahmen der eigenen Umfrage machten 12 Betreiber Angaben über den Gehalt an Dioxinen und Furanen in Rohschlacken. Die Werte für den Gesamtgehalt schwanken bei 11 der Anlagen im empfohlenen Bereich unterhalb von 30 ng I-TE/kg zwischen 0,2 und 21 ng I-TE/kg; an einem Standort wurde dieser Bereich leicht überschritten. Der errechnete Mittelwert der 12 Anlagen beträgt 12,35 ng I-TE/kg.

In Abbildung 17 sind die gesammelten Informationen über den Glühverlust zusammengestellt.

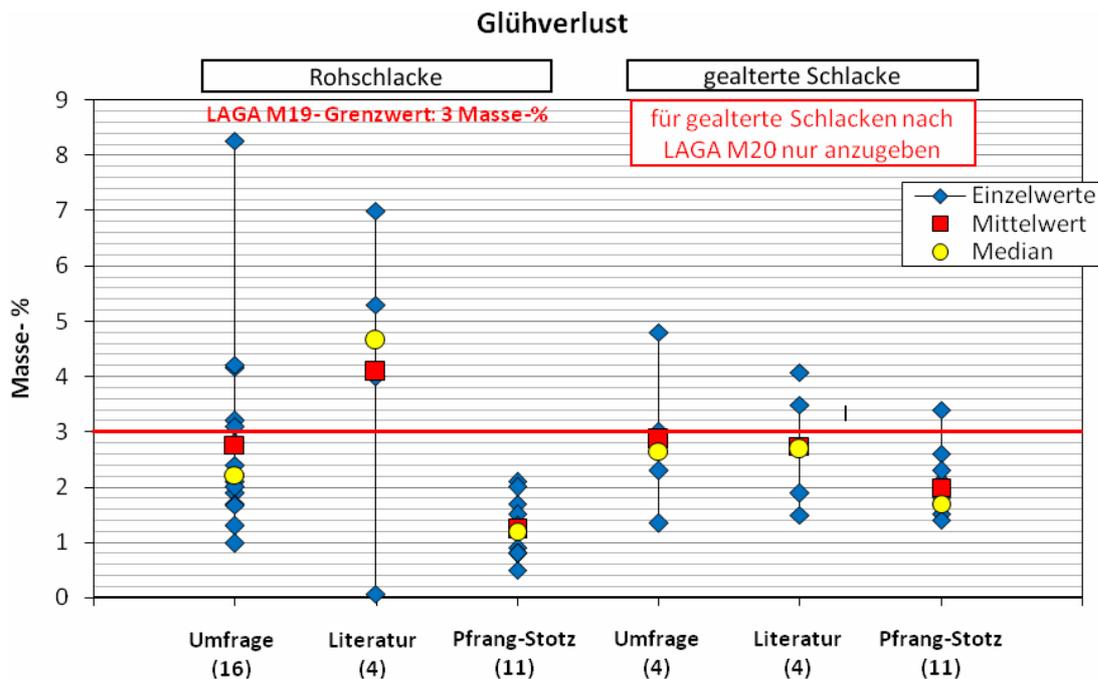


Abbildung 17: Schwankungsbreiten für den Glühverlust von Rohschlacken und gealterten Schlacken aus Umfrage, Literatur und von Pfrang-Stotz

Das Diagramm für den Glühverlust in Abbildung 17 zeigt bei den Werten aus der Umfrage und Literatur für Rohschlacken große Schwankungen um den geforderten Grenzwert von 3 Masse-%. Der Glühverlust der Rohschlacken liegt im Bereich zwischen 0,1 und 8,2 Masse-%. Der Medianwert bei 2,2 Masse-% zeigt jedoch, dass der Großteil der Anlagen aus der Umfrage den geforderten Grenzwert einhält. Die Rohschlacken aus den von Pfrang-Stotz untersuchten Anlagen halten den Grenzwert sicher ein. Für gealterte Schlacken schwankt der Glühverlust zwischen 1,4 und 4,8 Masse-%. Bei den Daten von Pfrang-Stotz ist ein geringer Anstieg des Glühverlustes nach dreimonatiger Alterung zu erkennen, der aus der Einbindung von Kohlendioxid in die während der Alterung entstehenden Carbonatphasen resultiert [HENSCHHEL 1999].

Neben dem Gehalt an Dioxinen/Furanen und dem Glühverlust werden in den oben genannten Vorschriften der LAGA Maximalgehalte für Schwermetallgehalte in Rohschlacken vorgegeben. Die Konzentrationen der entsprechenden Schwermetalle im Feststoff sind, zusammen mit den geforderten Grenzwerten (LAGA M19), in den folgenden Abbildungen dargestellt. Im Einzelnen werden die chemischen Elemente Arsen, Blei, Cadmium, Chrom, Kupfer, Nickel und Zink betrachtet.

In Abbildung 18 wird zunächst auf den Arsengehalt eingegangen.

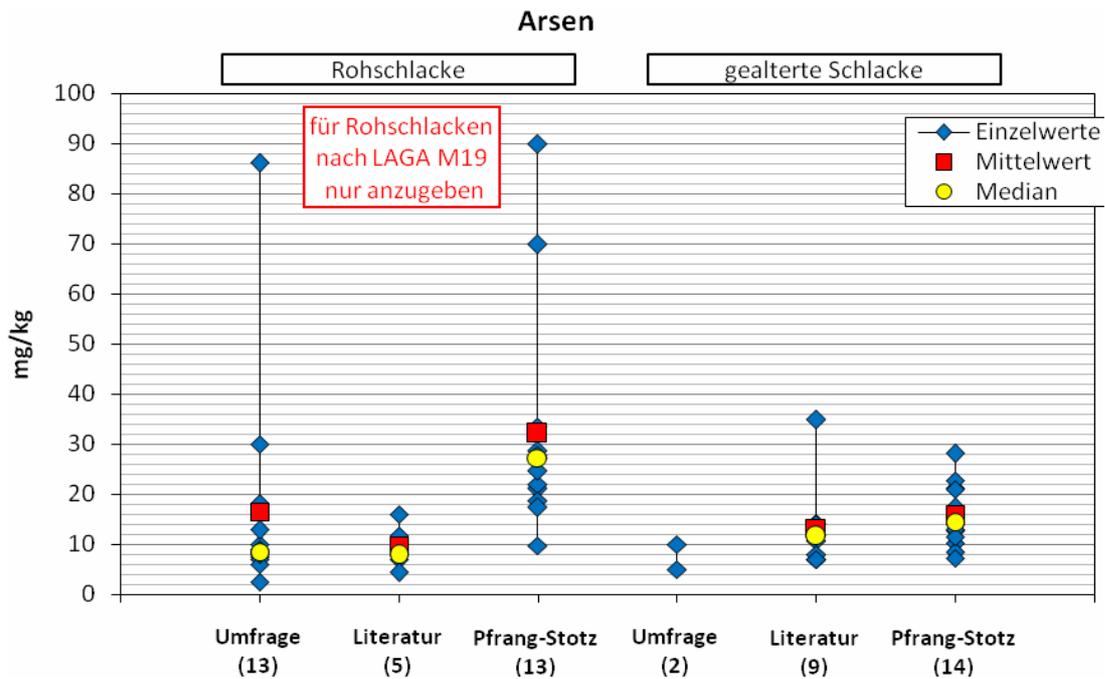


Abbildung 18: Schwankungsbreiten des Arsengehaltes im Feststoff von Rohschlacken und gealterten Schlacken aus Umfrage, Literatur und von Pfrang-Stotz

Entsprechend Abbildung 18 schwankt der Arsengehalt in der Schlacke, abgesehen von wenigen Ausreißern, zwischen 1 und 35 mg/kg.

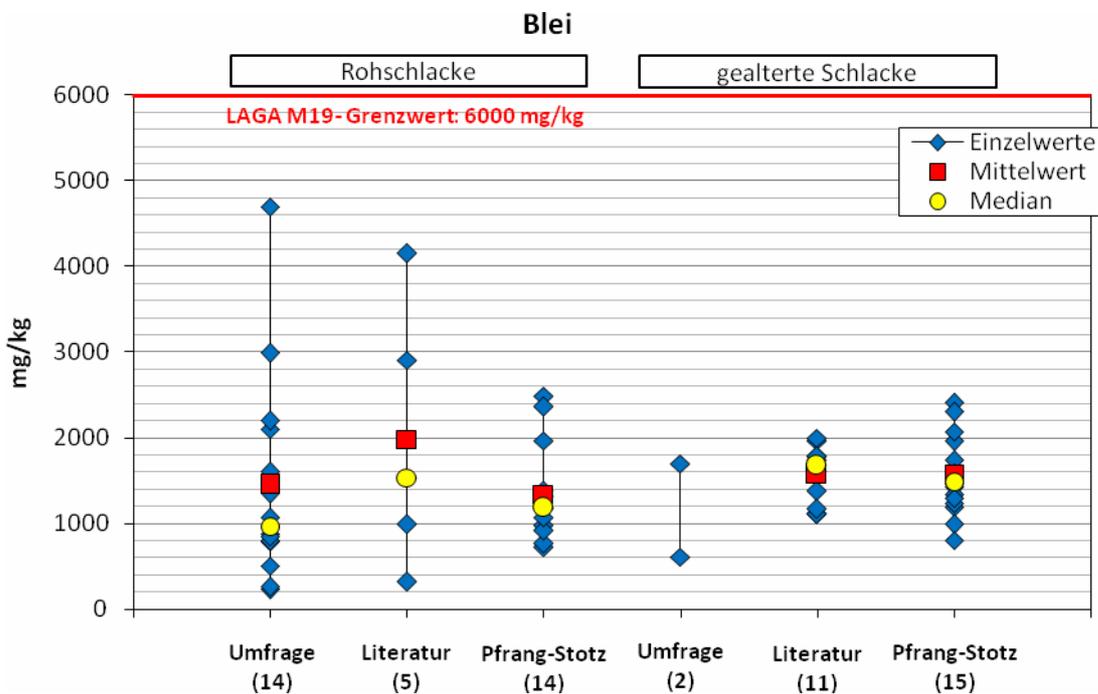


Abbildung 19: Schwankungsbreiten des Bleiehaltes im Feststoff von Rohschlacken und gealterten Schlacken aus Umfrage, Literatur und von Pfrang-Stotz

Aus den in Abbildung 19 dargestellten Werten kann für Blei eine Schwankungsbreite von 200 bis 4800 mg/kg für die Rohschlacken und von 600 bis 2400 mg/kg für die gealterten Schlacken ermittelt werden. Die Medianwerte in Abbildung 19 zeigen einen mittleren Bleiegehalt im Feststoff von Schlacken zwischen 1000 und 1700 mg/kg.

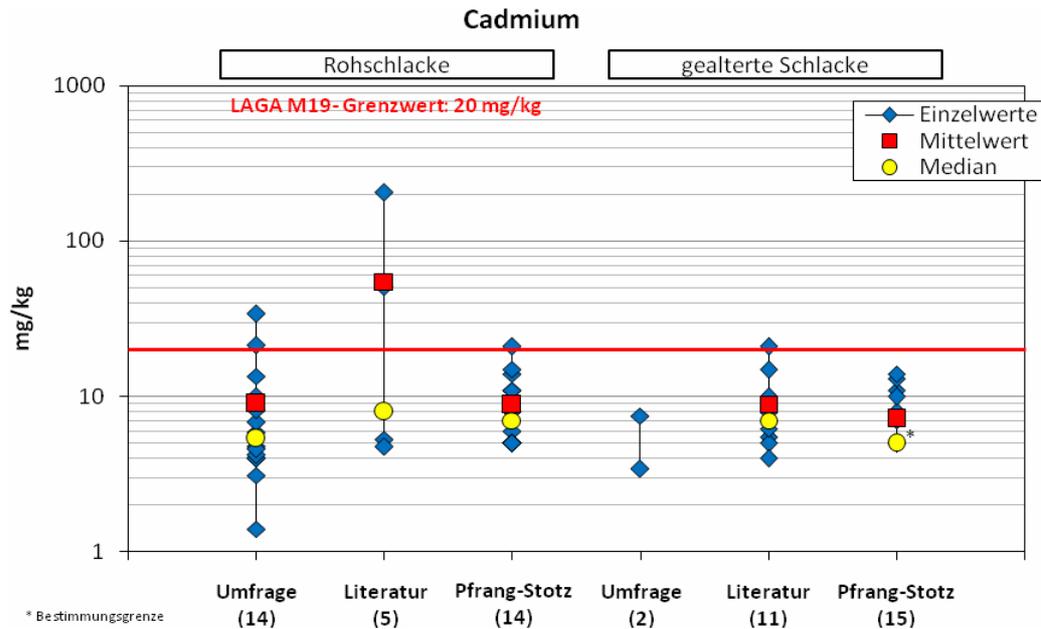


Abbildung 20: Schwankungsbreiten des Cadmiumgehaltes im Feststoff von Rohschlacken und gealterten Schlacken aus Umfrage, Literatur und von Pfrang-Stotz

Es ist zu beachten, dass im Sinn einer besseren Darstellung für das chemische Element Cadmium in Abbildung 20 eine logarithmische Auftragung der Werte vorgenommen wurde. Der Cadmiumgehalt der MVA-Schlacken (Abbildung 20) liegt vor und nach der Alterung im Bereich von 1,5 bis 30 mg/kg. Bei Cadmium zeigen zwei Literaturwerte, dass der Cadmiumgehalt in Rohschlacken bis um den Faktor 10 erhöht sein kann.

Chrom weist eine mögliche Bandbreite des Gehaltes von 50 bis 1500 mg/kg auf, wobei ein Literaturwert für Rohschlacke bei 2200 mg/kg liegt.

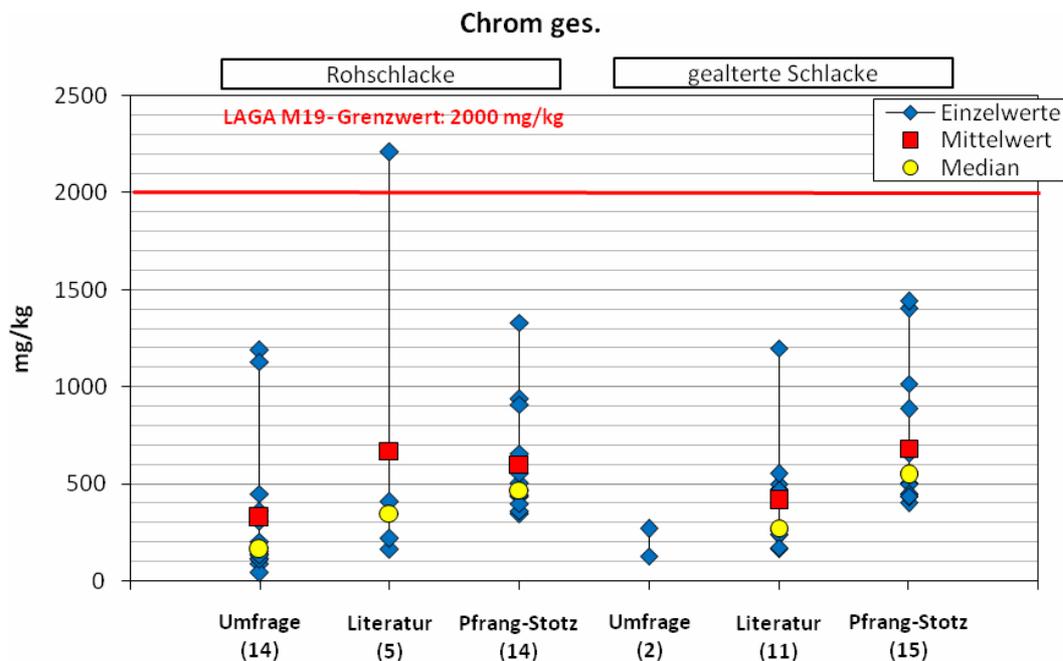


Abbildung 21: Schwankungsbreiten des Chromgehaltes im Feststoff von Rohschlacken und gealterten Schlacken aus Umfrage, Literatur und von Pfrang-Stotz

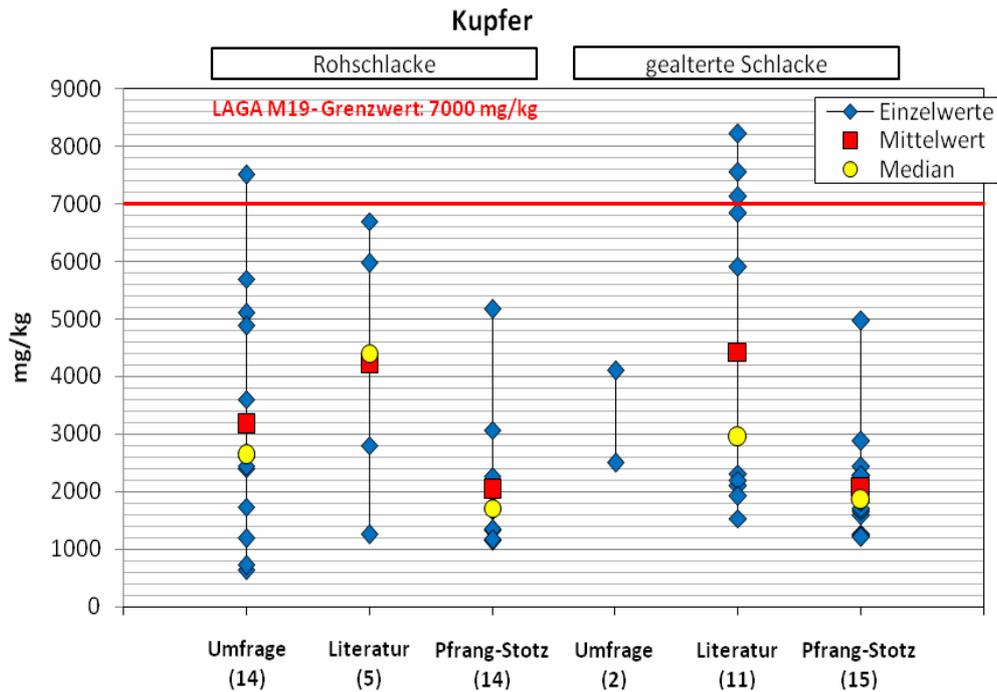


Abbildung 22: Schwankungsbreiten des Kupfergehaltes im Feststoff von Rohschlacken und gealterten Schlacken aus Umfrage, Literatur und von Pfrang-Stotz

Der Gehalt an Kupfer liegt entsprechend Abbildung 22 im Bereich von 600 bis 8200 mg/kg, die Medianwerte zeigen jedoch, dass die meisten Rohschlacken einen Gehalt im Bereich von 1800 bis 4400 mg/kg und die gealterten Schlacken im Bereich von 2000 bis 3000 mg/kg aufweisen.

Für eine einfachere Interpretation der Konzentrationswerte für das Element Nickel wurde in Abbildung 23 analog zu Cadmium eine logarithmische Darstellung gewählt.

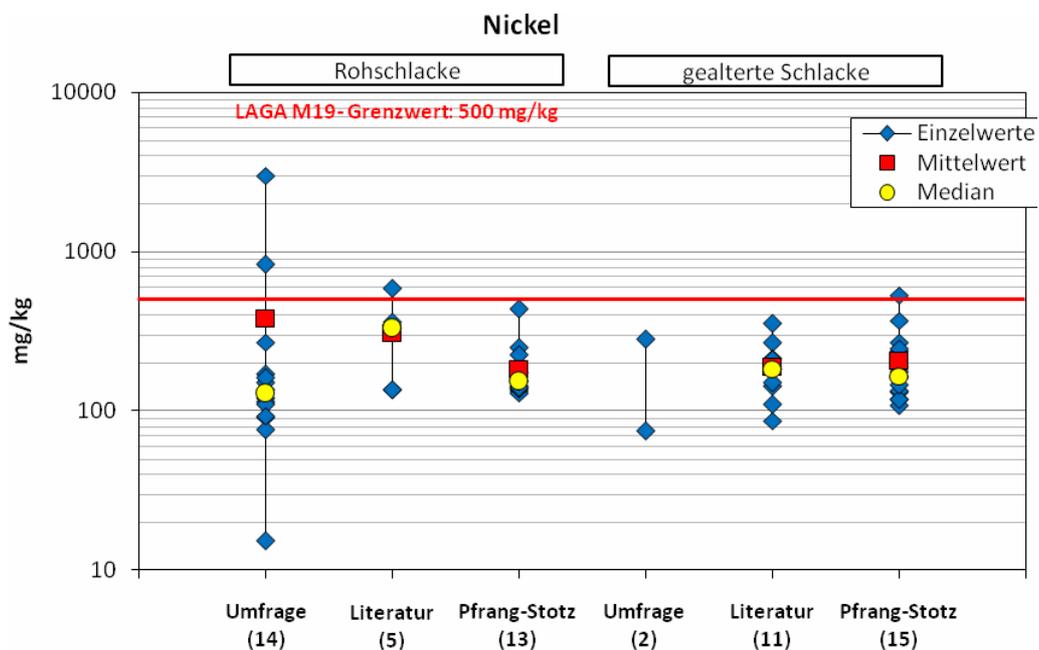


Abbildung 23: Schwankungsbreiten des Nickelgehaltes im Feststoff von Rohschlacken und gealterten Schlacken aus Umfrage, Literatur und von Pfrang-Stotz

Die Umfragewerte für den Nickelgehalt in Abbildung 23 der Rohschlacken zeigen eine Bandbreite von 20 bis 2300 mg/kg, allerdings für relativ wenige Werte. Der Median und der Mittelwert der Umfragedaten liegen im Bereich zwischen 100 und 500 mg/kg, in dem auch die Werte aus den anderen Quellen liegen, sowohl für Rohschlacke als auch für gealterte Schlacke. Es ist davon auszugehen, dass die große Schwankungsbreite durch wenige Ausreißer verursacht wurde.

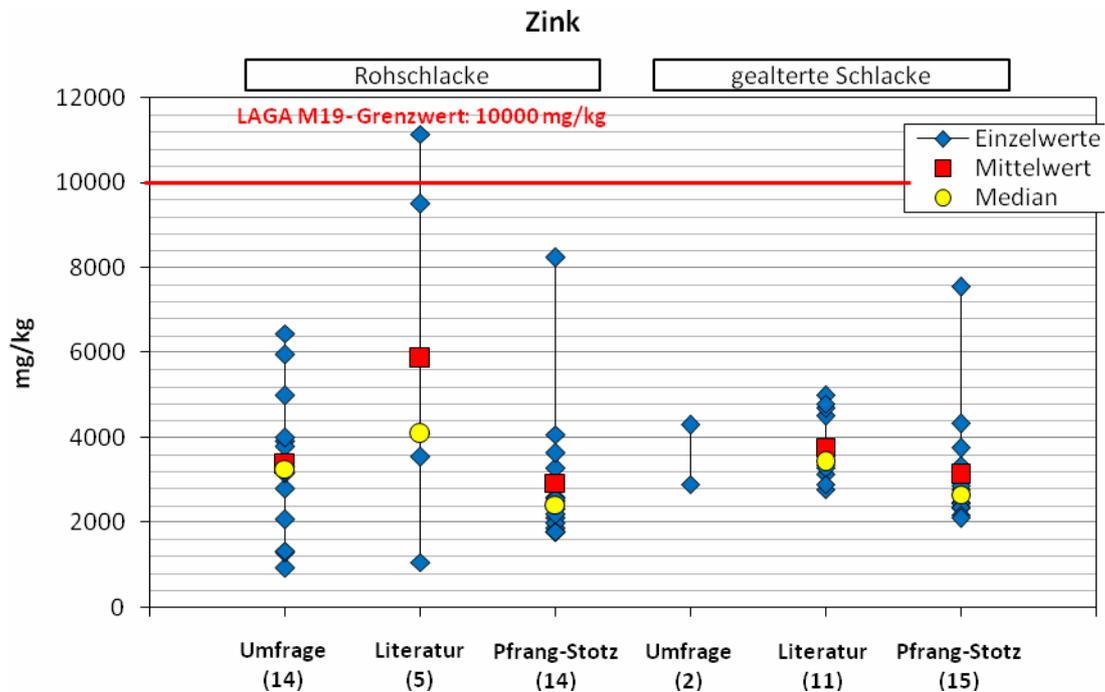


Abbildung 24: Schwankungsbreiten des Zinkgehaltes im Feststoff von Rohschlacken und gealterten Schlacken aus Umfrage, Literatur und von Pfrang-Stotz

Die Werte für den Zinkgehalt der Rohschlacken aus Abbildung 24 liegen insgesamt im Bereich von 800 bis 11200 mg/kg und für die gealterten Schlacken im Bereich von 2000 bis 7600 mg/kg.

Die Ergebnisse zeigen, dass die untersuchten Rohschlacken hinsichtlich ihrer Blei-, Chrom-, Kupfer-, Nickel-, Cadmium- und Zinkkonzentrationen im Feststoff bis auf einzelne geringe Überschreitungen (Ausreißer) für eine Verwertung geeignet sind. Die Schwankungsbreiten der Konzentrationen sind für abgelagerte Schlacken im Allgemeinen weniger stark ausgeprägt. Die gealterten Schlacken unterschreiten die Anforderung bis auf wenige Literaturwerte bei Kupfer deutlich.

Als weiteres Kriterium für die Verwertbarkeit von Rohschlacken ist der Summenparameter EOX im Feststoff zu beachten, der den Gehalt an extrahierbaren organischen Halogenverbindungen (Brom-, Chrom- und Jodverbindungen) beschreibt. Der in Abbildung 25 eingezeichnete Grenzwert von 3 mg/kg gilt entsprechend den LAGA-Vorschriften für aufbereitete und für gelagerte Schlacken.

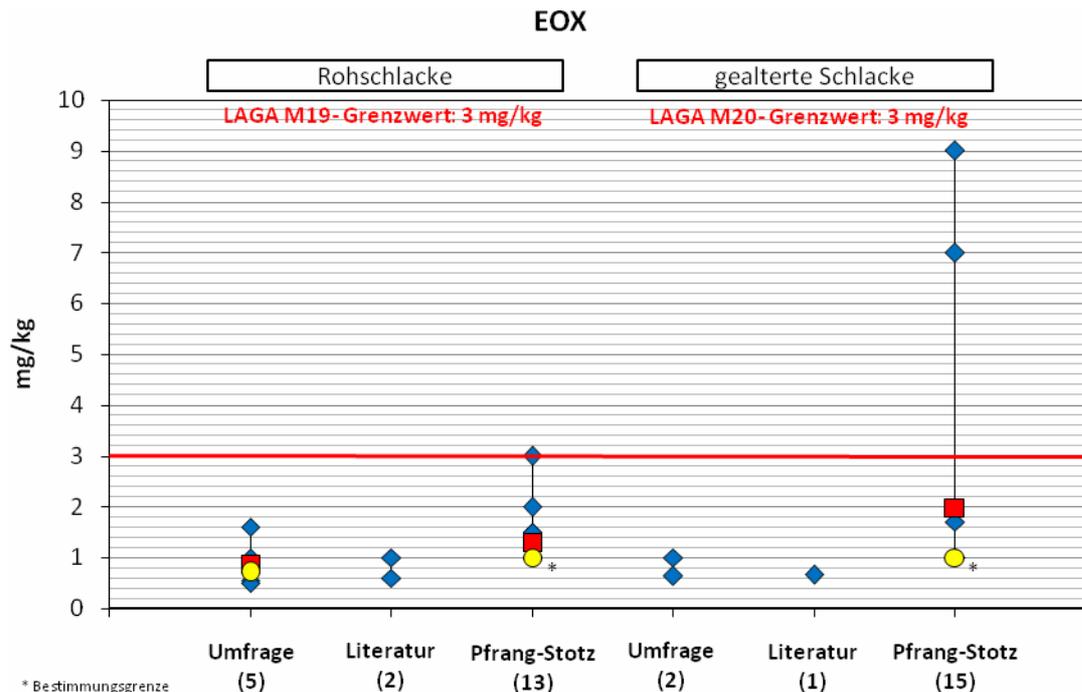


Abbildung 25: Schwankungsbreiten des Feststoffparameters EOX in Rohschlacke und gealterter Schlacke aus Umfrage, Literatur und von Pfrang-Stotz

Für den Summenparameter EOX wurden nur sehr wenige Daten in der Umfrage angegeben. Auch in der Literatur wurden nur wenige Angaben zu diesem Parameter gefunden. Pfrang-Stotz [PFRANG-STOTZ 2005] hingegen untersuchte sowohl die Rohschlacken als auch die 3 Monate gealterten Schlacken aller Anlagen auf diesen Parameter. Abgesehen von wenigen Ausreißern zeigen die aus den Umfrage- und Literaturdaten gebildeten Medianwerte einen EOX-Gehalt von 1 mg/kg sowohl in Rohschlacken als auch in gealterten Schlacken (Siehe Abbildung 25). Dieser Wert stellt gleichzeitig die Bestimmungsgrenze bei den meisten von Pfrang-Stotz ermittelten Konzentrationen dar, wodurch bei diesem Datensatz von einem EOX-Gehalt von unter 1 mg/kg ausgegangen werden kann. Somit wird der Zuordnungswert Z2 von 3 mg/kg der LAGA M20 von den meisten Schlacken deutlich unterschritten.

Für entsprechend LAGA M20 [LAGA M20 2004] aufbereitete und gealterte Schlacken ist nach Tabelle 3 neben dem Grenzwert für EOX zusätzlich der Grenzwert für den Summenparameter TOC zu beachten. Die Informationen zum TOC sind in Abbildung 26 dargestellt.

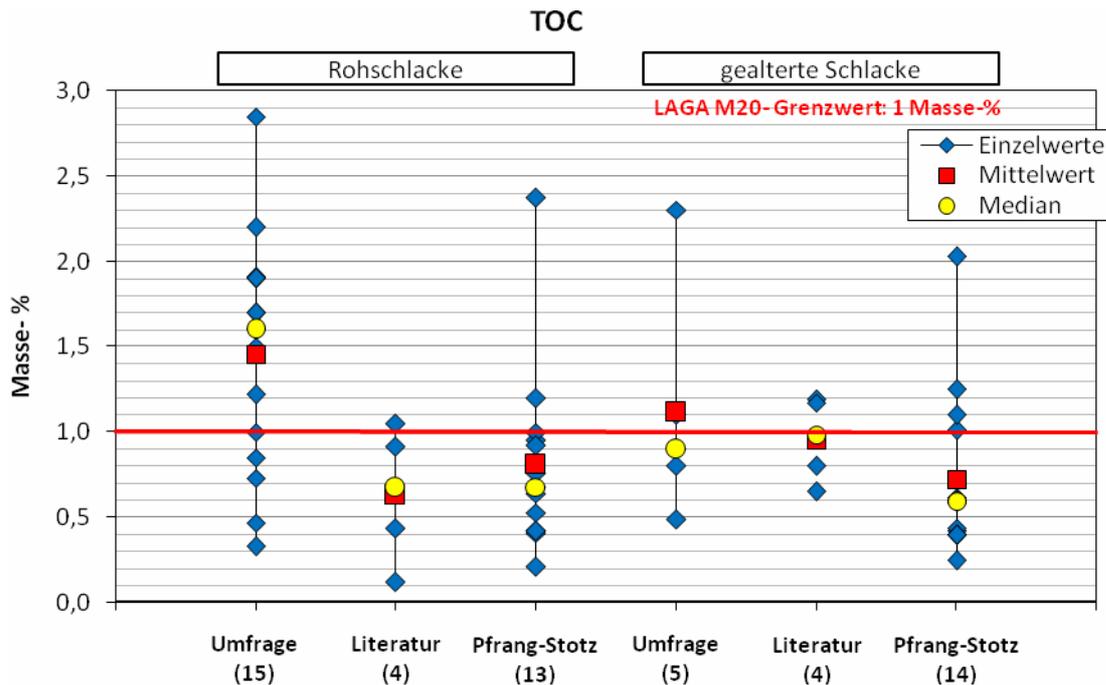


Abbildung 26: Schwankungsbreiten des Feststoffparameters TOC in Rohschlacken und gealterten Schlacken aus Umfrage, Literatur und von Pfrang-Stotz

Wie Abbildung 26 zu entnehmen ist, schwanken die TOC- Werte der Rohschlacken im Bereich von 0,1 bis 2,9 Masse-%. Die TOC-Werte der gealterten Schlacken liegen in einem ähnlichen Schwankungsbereich von 0,2 bis 2,7 Masse-%. Die Betrachtung der Medianwerte zeigt aber, dass der geforderte TOC- Wert für gealterte Schlacken von 1 Masse-% von den meisten Schlacken und in allen drei Datensätzen eingehalten wird. Selbst der Großteil der Rohschlacken halten diesen Grenzwert ohne Alterung und Aufbereitung ein. Die TOC-Spitzenwerte der Umfragedaten zeigen aber auch, dass die Rohschlacken den Grenzwert bis um das Dreifache überschreiten können.

Eine mögliche Ursache für diese Überschreitung könnte die Zuführung des Rostdurchfalls zur Schlacke sein. Um den Anteil an Unverbrannten und damit gleichzeitig den TOC- Gehalt so niedrig wie möglich zu halten, ist es vorteilhaft den Rostdurchfall in den Feuerraum zurückzuführen (Siehe Abschnitt 6.5). Von den an der Umfrage beteiligten Anlagen wird lediglich an vier Standorten der Rostdurchfall auf diesem Weg abgeführt. An den anderen 16 Standorten wird der Rostdurchfall der Schlacke zugeführt, eine Anlage machte im Rahmen der Umfrage keine Angabe. Allerdings zeigte ein Vergleich der TOC-Werte aus der Umfrage keine signifikante Abhängigkeit vom Umgang mit dem Rostdurchfall.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die größten Schwankungen bei den Umfragedaten auftreten und die geringsten bei den Daten von Pfrang-Stotz. Dies kann darauf zurückgeführt werden, dass die Daten von Pfrang-Stotz Mittelwerte aus vielen Einzelbeprobungen an der jeweiligen Anlage darstellen, während die Umfragedaten jeweils Momentwerte repräsentieren.

Außerdem ist festzustellen, dass die Schwankungsbreiten bei den Rohschlacken insgesamt größer sind als bei den gealterten Schlacken. Daran erkennt man die besondere Bedeutung der Aufbereitungsmaßnahmen und der Alterungsprozesse. Allein der Materialumschlag für die Alterung bewirkt eine Durchmischung und somit eine erste Homogenisierung der Schlacke.

Durch den Vergleich der aktuellen Daten aus der eigenen Umfrage, hauptsächlich bestehend aus Einzelanalysen, mit teilweise mehrere Jahre alten Literaturwerten und von Daten von Pfrang-Stotz können Aussagen über die Schwankungsbreiten und mittleren Gehalten der nach LAGA relevanten Feststoffparameter getroffen werden.

Die Werte von den drei unterschiedlichen Datenquellen liegen sowohl bei den Rohschlacken als auch bei den gealterten Schlacken in ähnlichen Bereichen, was in Abhängigkeit von der Anzahl eingeflossener Daten die berechneten Medianwerte sehr gut verdeutlichen. Die Betrachtung der Medianwerte zeigt auch, dass die genannten LAGA- Qualitätskriterien für den Feststoff von Rohschlacken und gealterten Schlacken im Allgemeinen gut eingehalten werden. Der Medianwert für TOC aus der Umfrage für Rohschlacken zeigt allerdings eine deutliche Überschreitung des LAGA-Grenzwertes, aus den Literaturwerten wurde ein Medianwert im Bereich des LAGA-Grenzwertes für gealterte Schlacken ermittelt. Dieser Sachverhalt belegt, dass ein weiterer Bedarf bzgl. der Optimierung des Verbrennungsprozesses besteht.

8.3 Elutionsverhalten

Für eine Verwertung oder Beseitigung der Schlacken ist neben der Charakterisierung durch die Hauptbestandteile und Feststoffparameter das Elutionsverhalten von Schadstoffen bei Kontakt mit Wasser zu berücksichtigen. In Abschnitt 6.7 wurden die Untersuchungsverfahren und der allgemeine Stand des Wissens vorgestellt.

Analog zur Betrachtung der Hauptbestandteile und Feststoffparameter werden in diesem Abschnitt die Informationen aus der eigenen Umfrage mit den in der Literatur gefundenen Werten und den Daten von Pfrang-Stotz [PFRANG-STOTZ 2005] verglichen.

In den folgenden Darstellungen der Ergebnisse werden nur die in der LAGA M20 angegebenen Eluatparameter berücksichtigt. Entsprechend den Erläuterungen oben im Text gelten diese Eluatparameter nur für nach LAGA-Vorschriften gealterte und aufbereitete Schlacken. Um den Einfluss der Alterung auf das Elutionsverhalten aufzeigen zu können, werden zum Vergleich die entsprechenden Eluatwerte von Rohschlacken ebenfalls mit dargestellt. Um die Vergleichbarkeit zu gewährleisten wurden ausschließlich Werte von Schlackeeluat, die nach dem DEV S4- Verfahren hergestellt worden sind, berücksichtigt.

Die Rohschlacken wurden im Regelfall direkt nach dem Entschlacken einer MVA beprobt und anschließend hinsichtlich ihrer Eluierbarkeit untersucht. Unter gealterte Schlacken fallen Schlacken, die abgelagert und aufbereitet wurden. Für die Werte aus der Umfrage wurde durchweg eine Alterungsdauer von drei Monaten angegeben. Der Umfang der Aufbereitung unterscheidet sich dagegen erheblich.

Die Literaturdaten differieren stark hinsichtlich der Alterungsdauer. Die meisten Werte beruhen auf drei Monate gelagerten Schlacken. In der Betrachtung werden auch Eluatdaten von wenigen Wochen bis mehreren Jahren alten Schlacken mit einbezogen. Über Aufbereitungsmaßnahmen wurden in der Literatur meist keine detaillierten Angaben gemacht.

Die Eluatwerte von Pfrang-Stotz wurden für gealterte Schlacken ermittelt, die eine Lagerungszeit von drei Monaten aufweisen und konventionell aufbereitet wurden.

Bei den Umfrage- und Literaturdaten stammen die Eluatkonzentrationen für Rohschlacken in der Regel aus anderen Anlagen als die Eluatkonzentrationen der gealterten Schlacken. Bei Pfrang-Stotz wurden hingegen beide Schlackearten bei den jeweiligen Anlagen auf Eluatwerte untersucht.

In den nachfolgenden Abbildungen wurde für einige Eluatparameter die logarithmische Darstellung der Schwankungsbreiten gewählt, weil dadurch die Verteilung der einzelnen Werte besser veranschaulicht werden konnte. Ferner wurden bei den Eluatwerten häufig die

Bestimmungsgrenzen angeben. Stellen diese Bestimmungsgrenzen bei einigen Parametern die Obergrenze dar, so wurde dies in den jeweiligen Diagrammen vermerkt. Stellen sie die Untergrenze dar oder befinden sie sich mit anderen quantitativ bestimmten Werten innerhalb einer Schwankungsbreite, wurde nur der Wert ohne Vermerk eingezeichnet.

In den unteren Beschriftungen der Diagramme in den folgenden Abbildungen ist in Klammern die jeweilige Anzahl einbezogener Anlagen angegeben. Standen zu einer Anlage mehrere Werte für die jeweiligen Parameter zur Verfügung, wurde das arithmetische Mittel aus diesen Werten gebildet und in das Diagramm eingefügt.

Das Diagramm in Abbildung 27 stellt die Daten zum pH- Wert des Eluats dar, der für eine Verwertung von gealterten Schlacken laut LAGA M20 (Siehe Tabelle 4) zwischen 7 und 13 liegen soll.

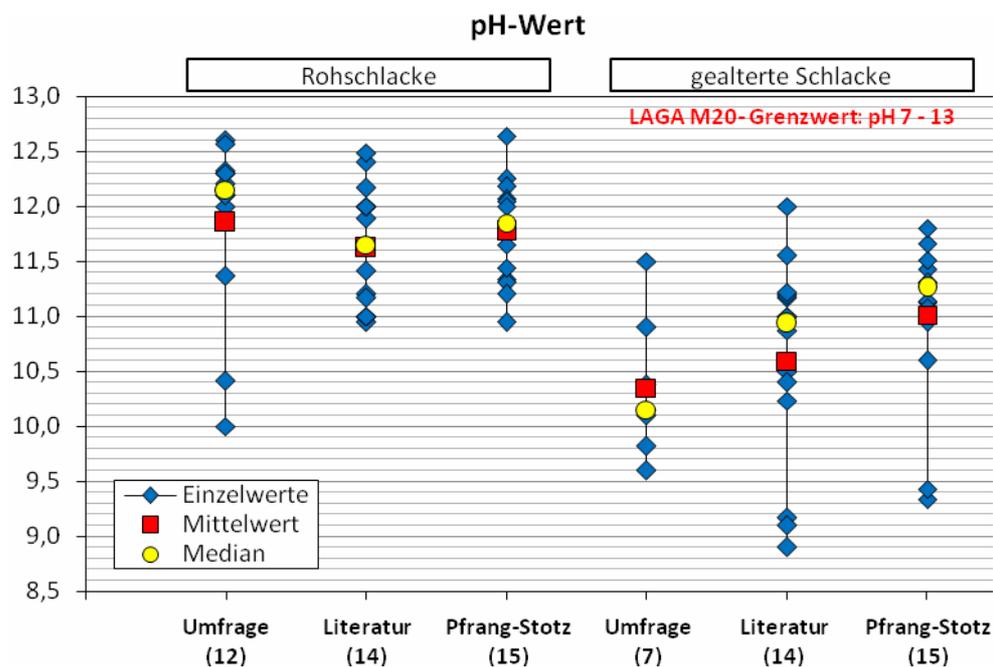


Abbildung 27: Schwankungsbreiten des pH- Werts von Rohschlacken und gealterten Schlacken aus Umfrage, Literatur und mit Daten von Pfrang-Stotz

Diese Anforderung der LAGA M20 wird sowohl von den Rohschlacken mit pH-Werten von 10 bis 12,6 als auch von den gealterten Schlacken mit pH-Werten im Bereich von 8,9 bis 12 sicher eingehalten. Entsprechend Abbildung 27 führt die Alterung zu einer pH-Wert-Absenkung im Eluat um 1-3 Einheiten. Wesentliche Ursachen stellen die Wasseraufnahme, vorwiegend im Entschlacker, und die anschließende Carbonatisierung während der Alterung dar. (Siehe Abschnitt 6.6, [PFRANG-STOTZ 2005] [GERVEN 2005] [KÖSTER 2002]).

In Abbildung 28 sind die vorliegenden Daten für die elektrische Leitfähigkeit dargestellt. Der Grenzwert aus der LAGA M20 liegt bei von 6000 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

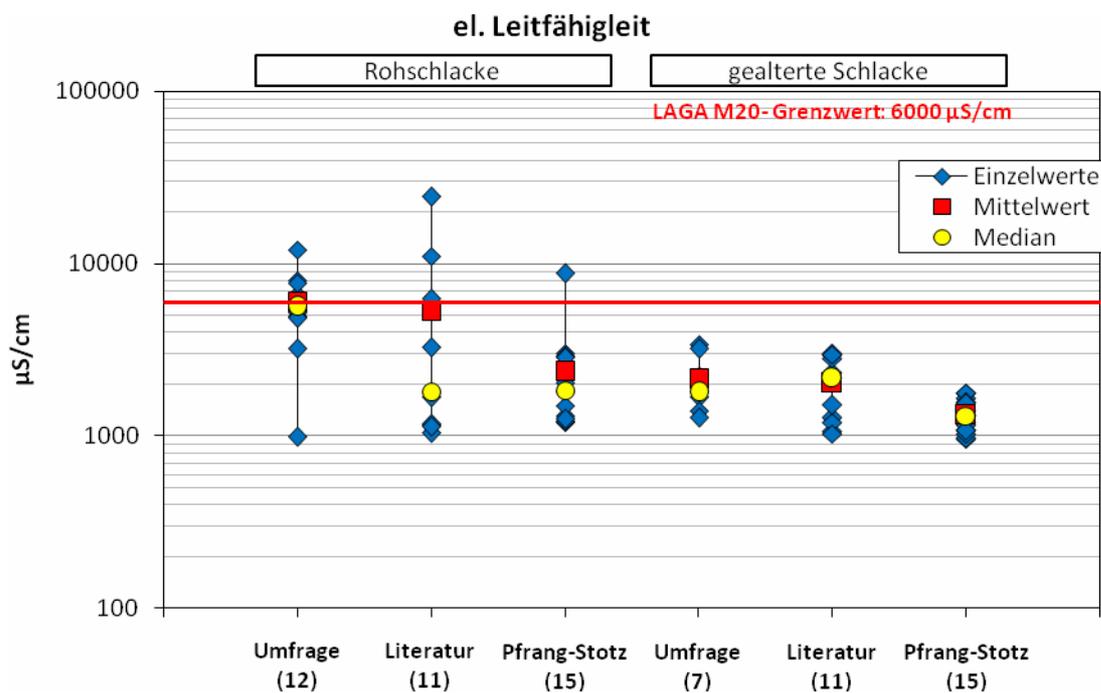


Abbildung 28: Schwankungsbreiten des Eluatparameters elektrische Leitfähigkeit von Rohschlacken und gealterten Schlacken aus Umfrage, Literatur und mit Daten von Pfrang-Stotz

Die in Abbildung 28 dargestellte Leitfähigkeit zeigt bei Rohschlacken große Schwankungsbreiten zwischen 1000 und 10000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, im Gegensatz zu gealterten Schlacken mit 1000 bis 3500 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Ein Eluatwert von Rohschlacke aus der Literatur weist sogar eine el. Leitfähigkeit von etwa 25000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ auf. Der Grenzwert von 6000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, gefordert in der LAGA M20 [LAGA M20 2004] für das Eluat gealterter Schlacken, wird in allen Fällen sicher eingehalten. Allgemein wird die Leitfähigkeit von Eluaten aus Schlacken durch leicht lösliche Salze bestimmt. Zu diesen Salzen gehören insbesondere die für das Eluat nach LAGA M20 limitierten Chloride und Sulfate.

Die Schwankungsbreiten der Chlorid- und Sulfatwerte im Eluat von Rohschlacken und gealterten Schlacken werden in Abbildung 29 und Abbildung 30 gezeigt.

Der in Abbildung 29 dargestellte Chloridgehalt im Eluat liegt sowohl bei den Rohschlacken als auch bei den gealterten Schlacken im Bereich von 10 bis 700 mg/l. Ein Eluatwert für Rohschlacke aus der Umfrage liegt mit 3200 mg/l wesentlich höher. Damit zeigt der Chloridgehalt teilweise große Schwankungen unterhalb und oberhalb von dem geforderten Grenzwert von 250 mg/l. Dieser Sachverhalt wurde insbesondere bei den Umfragewerten festgestellt.

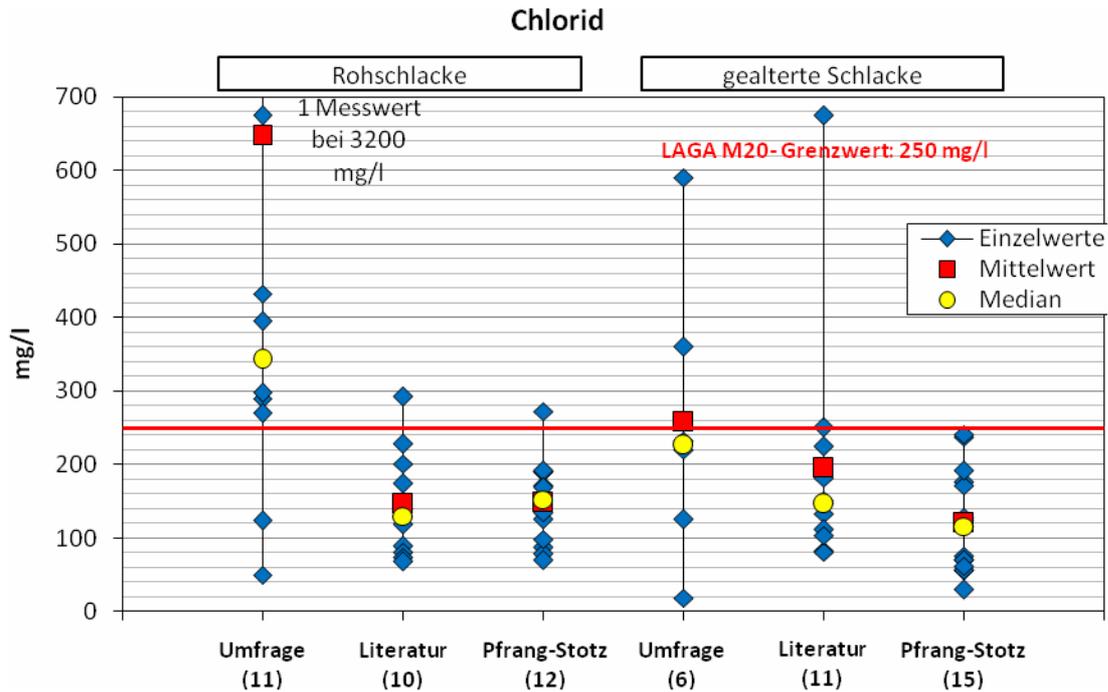


Abbildung 29: Schwankungsbreiten des Chloridgehaltes im Eluat von Rohschlacken und gealterten Schlacken aus Umfrage, Literatur und mit Daten von Pfrang-Stotz

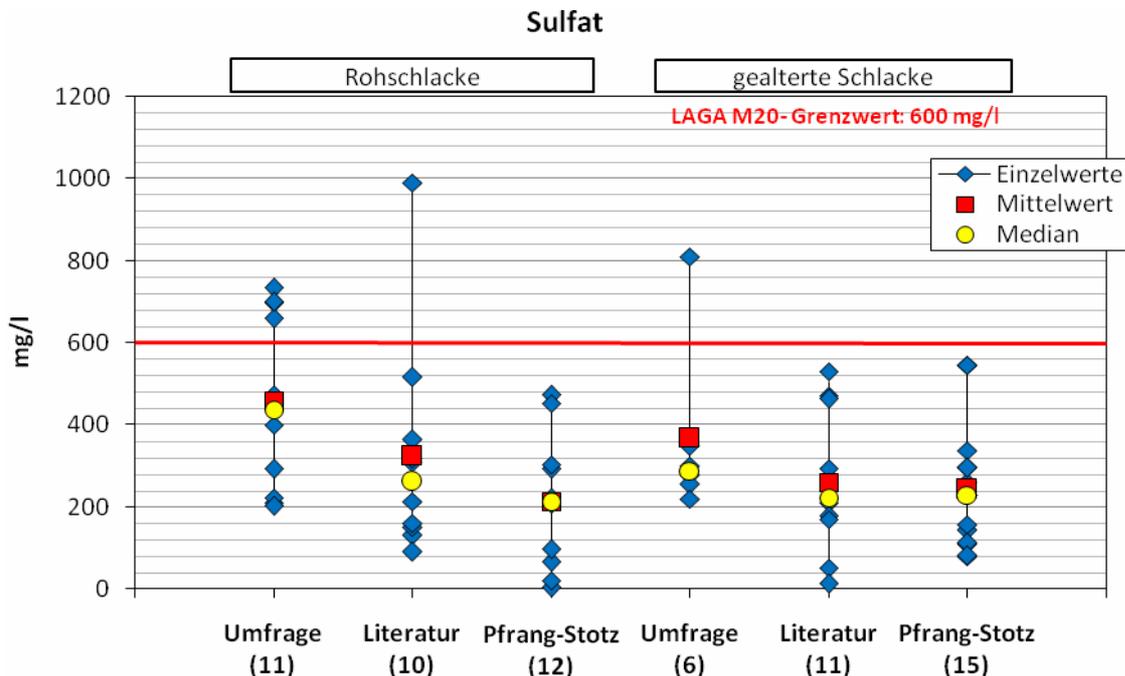


Abbildung 30: Schwankungsbreiten des Sulfatgehaltes im Eluat von Rohschlacken und gealterten Schlacken aus Umfrage, Literatur und mit Daten von Pfrang-Stotz

Der Sulfatgehalt im Eluat, dargestellt im Diagramm in Abbildung 30, schwankt bei den Rohschlacken zwischen 10 und 1000 mg/l und bei den gealterten Schlacken zwischen 10 und 800 mg/l. Damit halten die Sulfatkonzentrationen im Eluat der gealterten Schlacken den geforderten Grenzwert der LAGA M20 von 600 mg/l bis auf einen Ausreißer bei den Umfragewerten ein.

Im Vergleich zur Darstellung der elektrischen Leitfähigkeit sind keine signifikanten Unterschiede zwischen den Eluatkonzentrationen von Chlorid und Sulfat für Rohschlacken und gealterte Schlacken zu erkennen.

Eine weitere Gruppe von anorganischen Salzen, die im Eluat von gealterten Schlacken bei einer Verwertung laut LAGA M20 nur begrenzt vorkommen dürfen, sind Cyanide. Zu den Cyanid-Konzentrationen im Eluat lagen nur sehr wenige Daten aus Umfrage und Literatur zu vor.

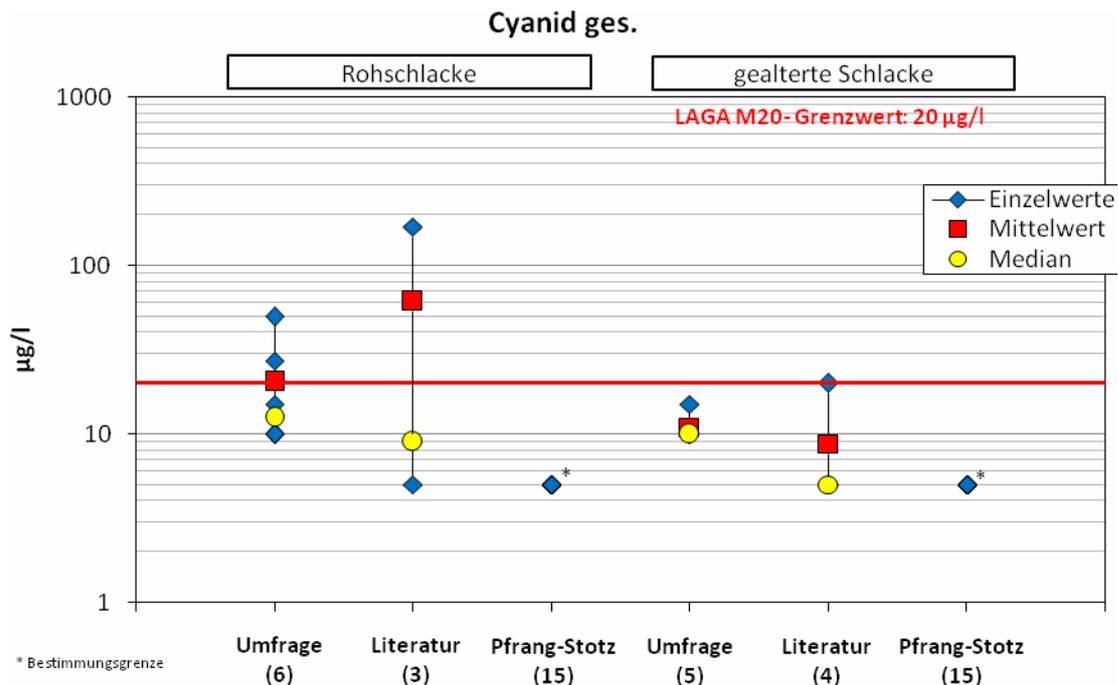


Abbildung 31: Schwankungsbreiten des Cyanidgehaltes im Eluat von Rohschlacken und gealterten Schlacken aus Umfrage, Literatur und mit Daten von Pfrang-Stotz

Einige Umfrage- und Literaturwerte in Abbildung 31 zeigen mögliche Cyanidkonzentrationen von bis zu 180 µg/l im Eluat der Rohschlacken und von bis zu 20 µg/l im Eluat der gealterten Schlacken. Die Medianwerte liegen bei beiden Datensätzen und Schlackearten im Bereich von 10 µg/l. Die Daten von Pfrang-Stotz befinden sich alle unterhalb der Bestimmungsgrenze von 5 µg/l und damit weit unterhalb des geforderten Wertes der LAGA M20 [LAGA M20 2004] von 20 µg/l.

In der LAGA M20 ist für gealterte Schlacken auch der gesamte Gehalt an gelösten organischen Kohlenstoffen (DOC) als Parameter zur Eluatuntersuchung aufgeführt, der lediglich zur Erfahrungssammlung zu bestimmen ist. Die ermittelten Werte zeigt Abbildung 32.

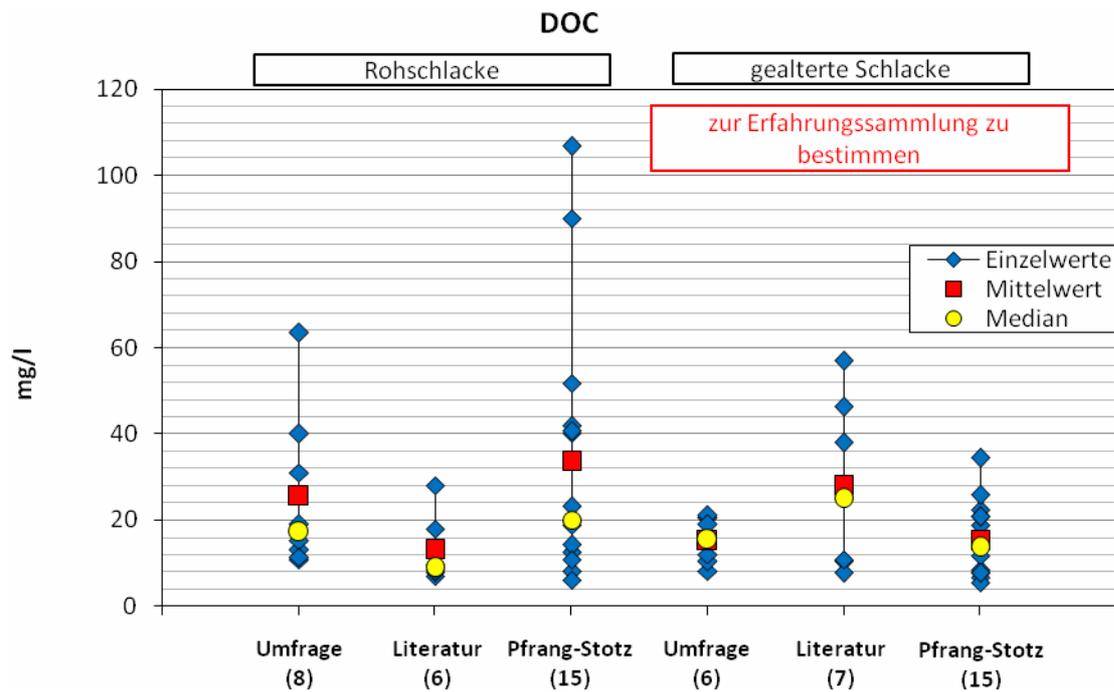


Abbildung 32: Schwankungsbreiten des Gehaltes gelöster organischer Kohlenstoffe (DOC) im Eluat von Rohschlacken und gealterten Schlacken aus Umfrage, Literatur und mit Daten von Pfrang-Stotz

Der Gehalt des gesamten gelösten organischen Kohlenstoffs (DOC) im Eluat von Rohschlacken liegt entsprechend Abbildung 32 zwischen 4 bis 107 mg/l und für gealterte Schlacken im Bereich von 4 bis 57 mg/l. Die Medianwerte belegen keine signifikanten Unterschiede zwischen Rohschlacken und gealterten Schlacken.

Hinsichtlich der Umweltverträglichkeit von Schlacken sind Schwermetalle von Bedeutung, so dass im Rahmen der Eluatversuche die Mobilität dieser Schadstoffe untersucht werden muss. Die folgenden Abbildungen geben einen Überblick über die eluierbaren Anteile von Schwermetallen in Rohschlacken und gealterten Schlacken. In Abbildung 33 sind die Eluatkonzentrationen von Arsen zusammengestellt, die nach LAGA M20 für gealterte Schlacken lediglich angegeben werden müssen.

Der in Abbildung 33 dargestellte Eluatgehalt von Arsen liegt sowohl bei frischer als auch bei gealterter Schlacke abgesehen von einem Ausreißer unterhalb von 10 µg/l, in den meisten Fällen bei 5 µg/l (siehe Medianwerte).

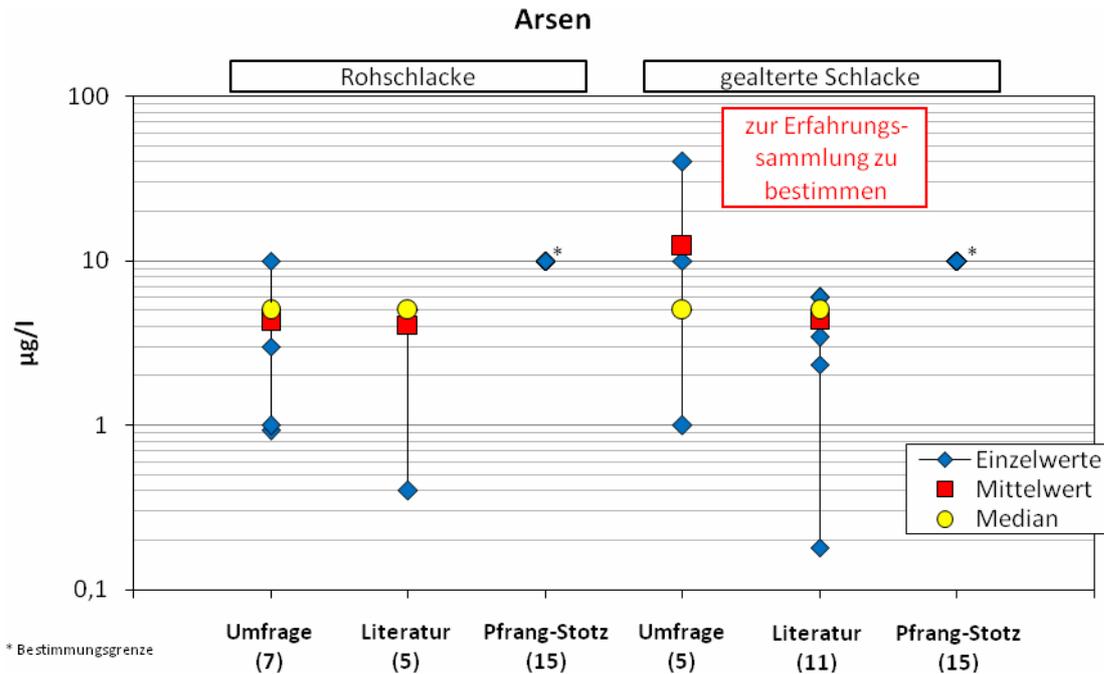


Abbildung 33: Schwankungsbreiten des Arsengehaltes im Eluat von Rohschlacken und gealterten Schlacken aus Umfrage, Literatur und mit Daten von Pfrang-Stotz

In Abbildung 34 sind die Bleigehalte in den Eluaten aufgeführt. Die Vorgaben der LAGA M20 schreiben einen Grenzwert für Blei im Eluat von 50 µg/l vor.

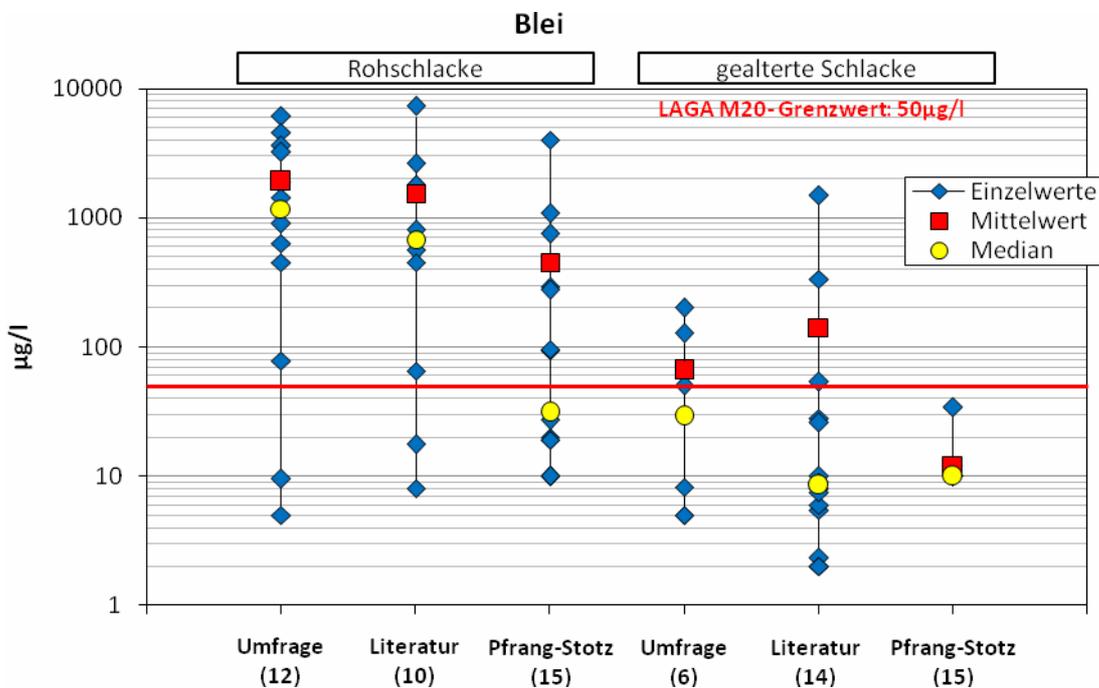


Abbildung 34: Schwankungsbreiten des Bleigehaltes im Eluat von Rohschlacken und gealterten Schlacken aus Umfrage, Literatur und mit Daten von Pfrang-Stotz

Für den in Abbildung 34 dargestellten Bleigehalt konnte eine Schwankungsbreite von 5 bis 7000 µg/l für das Eluat der Rohschlacken und von 2 bis 1100 µg/l für das Eluat der gealterten Schlacken ermittelt werden. Der geforderte Grenzwert von 50 µg/l kann nur von wenigen

Rohschlacken eingehalten werden, während die meisten gealterten Schlacken unterhalb des Grenzwertes liegen (siehe Medianwerte). Andere Untersuchungen bestätigen diese Problematik der Elution von Blei [ZWAHR 2005].

In der LAGA M20 wird auch Cadmium berücksichtigt; die maximal zulässige Konzentration im Eluat liegt bei 5 µg/l. Die Ergebnisse zu Cadmium zeigt Abbildung 35.

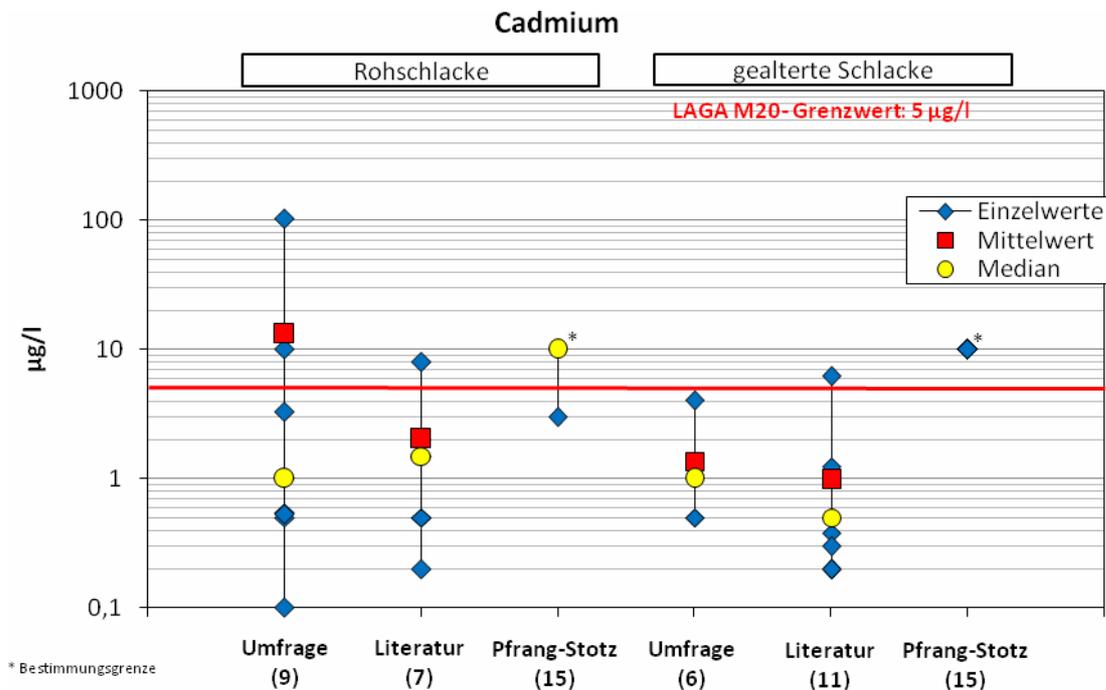


Abbildung 35: Schwankungsbreiten des Cadmiumgehaltes im Eluat von Rohschlacken und gealterten Schlacken aus Umfrage, Literatur und mit Daten von Pfrang-Stotz

Der Eluatgehalt von Cadmium in Abbildung 35 liegt vor und nach der Alterung von Schlacken im Bereich von 0,1 bis 10 µg/l, wobei ein Eluatwert für Rohschlacke aus der Umfrage bei 100 µg/l liegt. Die von der LAGA geforderten 5 µg/l für das Eluat gealterter Schlacken werden von den meisten untersuchten Schlacken eingehalten. In anderen Arbeiten werden im Fall von Cadmium Überschreitungen des LAGA- Grenzwertes festgestellt [ZWAHR 2005]

Für das chemische Element Chrom zeigt Abbildung 36 die ermittelten Werte im Vergleich zum LAGA-Grenzwert. Entsprechend der Abbildung 36 liegt die Bandbreite des Chromgehalts im Eluat für Rohschlacken zwischen 5 bis 60 µg/l, im Fall der gealterten Schlacken zwischen 5 bis 250 µg/l. Bis auf einen Wert bei den Umfragedaten über gealterte Schlacke liegen alle Werte unterhalb dem Grenzwert der LAGA von 200 µg/l.

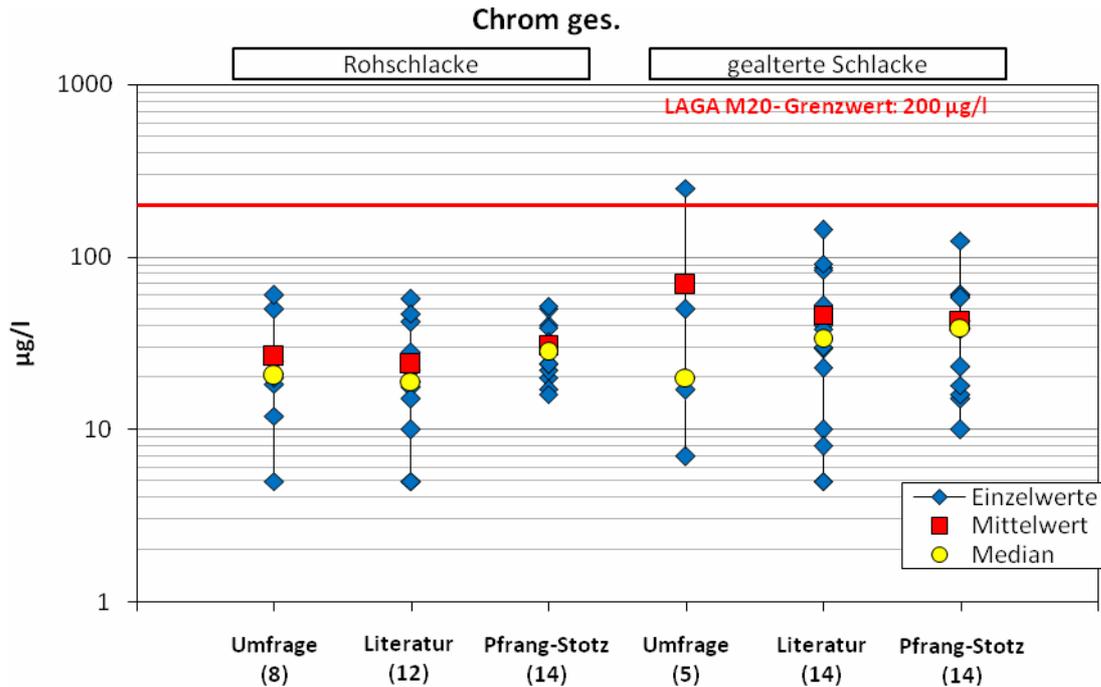


Abbildung 36: Schwankungsbreiten des Chromgehaltes im Eluat von Rohschlacken und gealterten Schlacken aus Umfrage, Literatur und mit Daten von Pfrang-Stotz

Die ermittelten Daten zu Kupfer in sind Abbildung 37 zusammengestellt. Der mobilisierbare Anteil an Kupfer in den Rohschlacken liegt im Bereich von 12 bis 1800 µg/l, der in den gealterten Schlacken im Bereich von 27 bis 700 µg/l. Anhand der Medianwerte in Abbildung 37 erkennt man, dass der Großteil der gealterten Schlacken den Grenzwert von 300 µg/l einhält. Ähnliche Befunde sind in [ZWAHR 2005] publiziert.

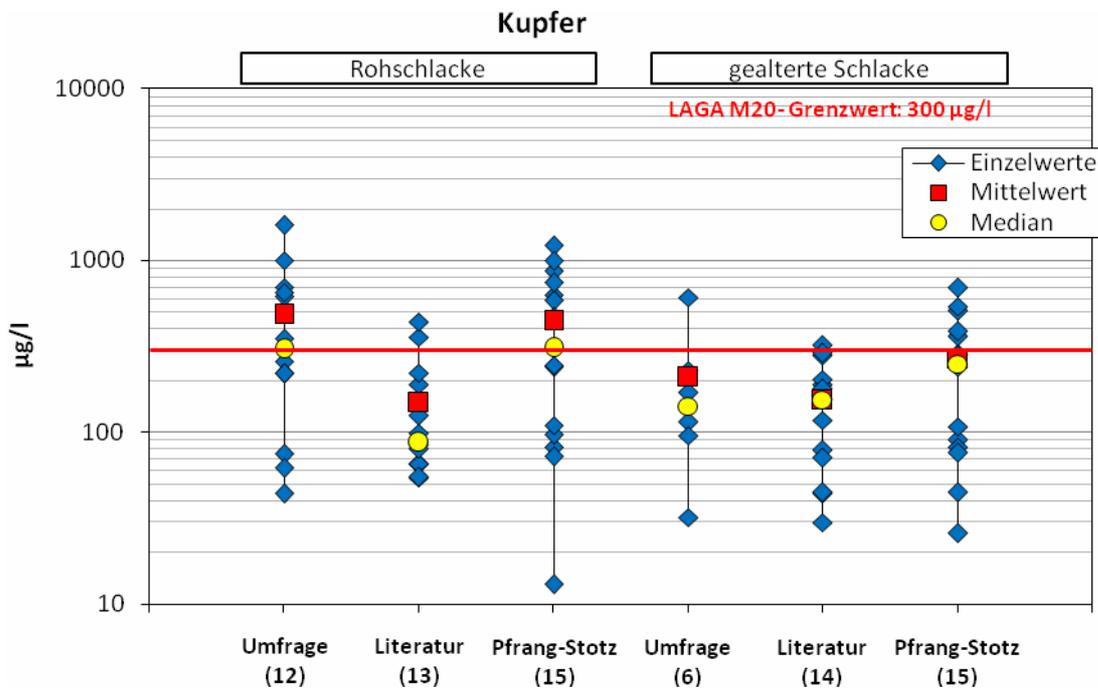


Abbildung 37: Schwankungsbreiten des Kupfergehaltes im Eluat von Rohschlacken und gealterten Schlacken aus Umfrage, Literatur und mit Daten von Pfrang-Stotz

Zu den in der LAGA M20 berücksichtigten Metallen gehört auch Nickel; den Vergleich der gesammelten Daten mit dem Grenzwert von 40 µg/l zeigt Abbildung 38.

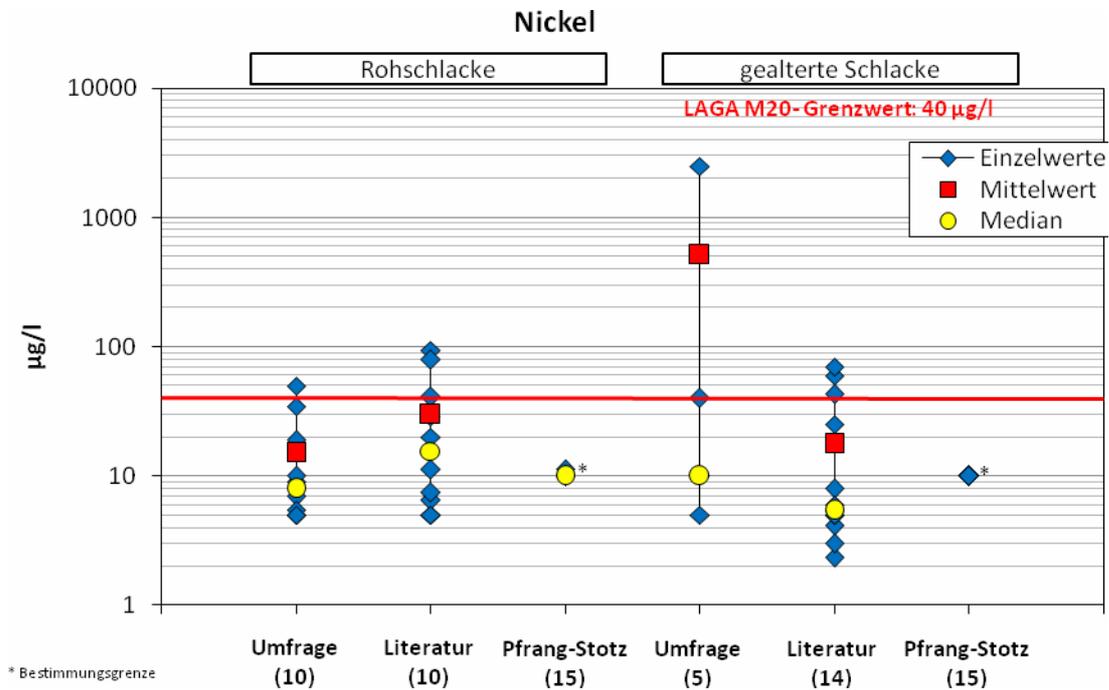


Abbildung 38: Schwankungsbreiten des Nickelgehaltes im Eluat von Rohschlacken und gealterten Schlacken aus Umfrage, Literatur und mit Daten von Pfrang-Stotz

Die Umfrage- und Literaturwerte in Abbildung 38 für den Eluatgehalt von Nickel zeigen eine Bandbreite von 5 bis 100 µg/l für Rohschlacken, während das Eluat der gealterten Schlacken einen Gehalt von 2 bis 70 µg/l (ein Ausreißer bei 2500 µg/l) aufweist. Die Werte für Nickel von Pfrang-Stotz liegen alle unterhalb der Bestimmungsgrenze von 10 µg/l und damit auch unterhalb dem Grenzwert der LAGA M20 [LAGA M20 2004] von 40 µg/l.

Der Eluatgehalt von Quecksilber, dargestellt in Abbildung 39 liegt bei beiden Schlackearten bis auf wenige Ausreißer im Bereich von 0,1 und 1 µg/l und damit unterhalb des Grenzwertes von 1 µg/l. Der höchste Wert aus den Daten von Pfrang-Stotz liegt bei 14,4 µg/l.

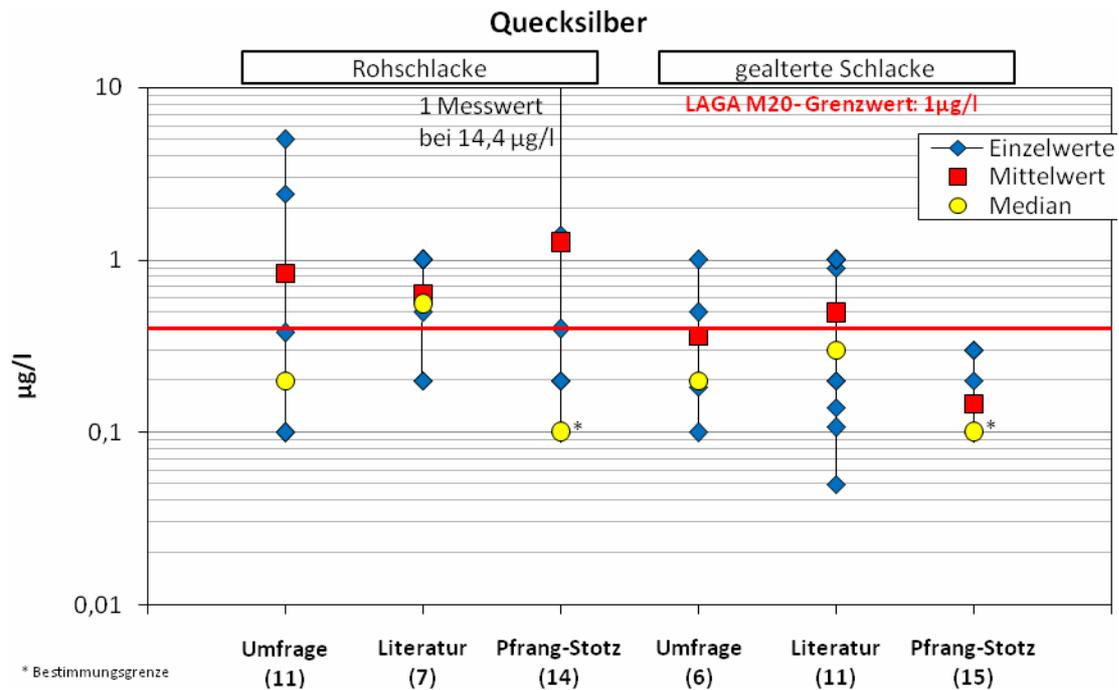


Abbildung 39: Schwankungsbreiten des Quecksilbergehaltes im Eluat von Rohschlacken und gealterten Schlacken aus Umfrage, Literatur und mit Daten von Pfrang-Stotz

Außerdem ist in der LAGA M20 Zink als weiteres Metall aufgeführt. Die Ergebnisse dokumentiert Abbildung 40.

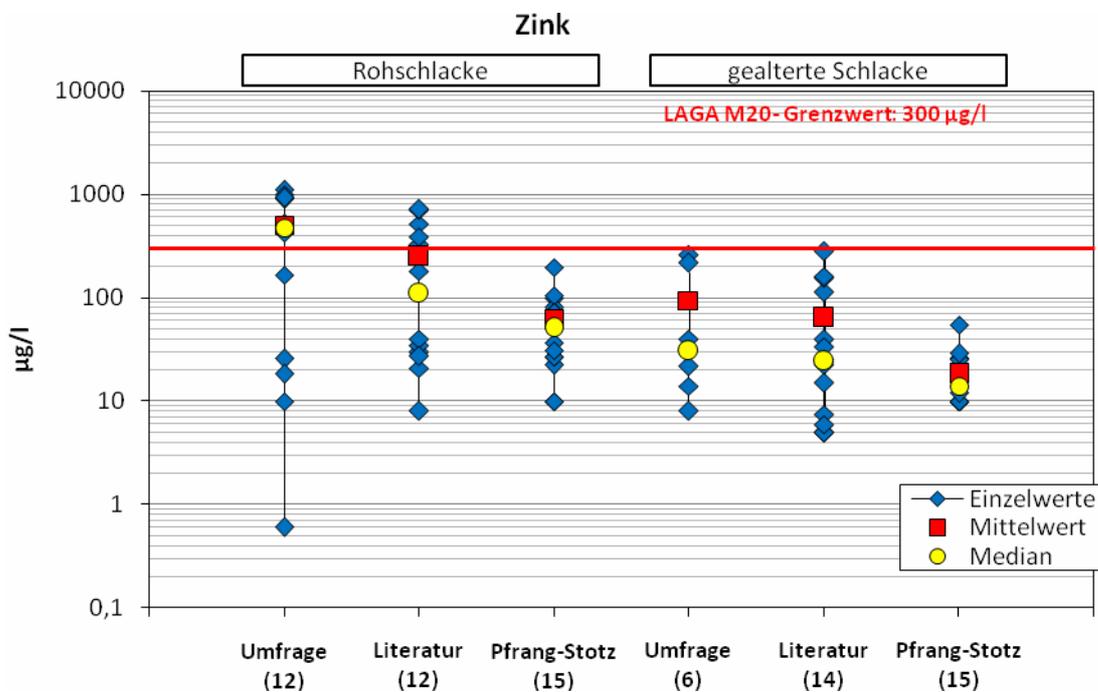


Abbildung 40: Schwankungsbreiten des Zinkgehaltes im Eluat von Rohschlacken und gealterten Schlacken aus Umfrage, Literatur und mit Daten von Pfrang-Stotz

Wie Abbildung 40 zeigt liegen die Werte für den Zinkgehalt des Eluats der Rohschlacken insgesamt im Bereich von 10 bis 1000 µg/l und für die gealterten Schlacken im Bereich von 5 bis 300 µg/l, und unterhalb von dem vorgegebenen Grenzwert von 300 µg/l.

Der Vergleich der Schwankungsbreiten der jeweiligen Schwermetallgehalte im Eluat von Rohschlacken und gealterten Schlacken zeigt, wie erwartet, für Blei einen deutlichen Einfluss der Alterung auf die Eluierbarkeit; infolge der Alterung nimmt diese signifikant ab. Auf Basis der Medianwerte kann auch bei Zink ein positiver Effekt der Alterung auf die Eluierbarkeit festgestellt werden. Deutliche Einflüsse der Alterung und Aufbereitung findet man zusätzlich beim pH-Wert.

Dies bestätigt die Ausführungen in Abschnitt 6.7, in denen Pfrang-Stotz und andere Autoren die Abnahme der Eluatkonzentrationen von Blei und Zink während der Alterung beschrieben haben, Dies wird mit dem Einbau dieser Elemente während der Carbonatisierung ins Kristallgitter von sich neu bildenden Calciumcarbonat begründet.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die Bandbreiten der Eluatparameter in allen drei Datensätzen (Umfrage, Literatur, Pfrang-Stotz), sowohl bei den Rohschlacken als auch bei den gealterten Schlacken, relativ gut übereinstimmen. Dies gilt auch für die berechneten Medianwerte.

Bei einigen Parametern sind starke Ausreißer feststellbar, insbesondere bei Elementen, die im Abfall als Partikel vorkommen können. Aus diesem Grund ist die Betrachtung der Medianwerte auch in Bezug auf die Einhaltung der Anforderungen der LAGA M20 [LAGA M20 2004] vorteilhaft, denn Ausreißer gehen aufgrund der Berechnungsvorschrift für den Median nicht so stark ein.

Die ermittelten Medianwerte liegen bei allen Eluatparametern für die gealterten Schlacken unterhalb der eingezeichneten Grenzwerte der LAGA. Folglich kann von einer Verwertbarkeit von drei 3 Monate gelagerter und aufbereiteter Schlacken in Bauvorhaben mit definierten Sicherungsmaßnahmen entsprechend der LAGA M20 ausgegangen werden.

Es ist abschließend darauf hinzuweisen, dass auf Grund der vorliegenden Daten und der Literatur [ZWAHR 2005] die sichere Einhaltung der LAGA-Grenzwerte für Blei, Cadmium und Kupfer nicht immer gewährleistet ist. Eine breitere Datenbasis unter Beteiligung aller deutschen Verbrennungsanlagen ist für eine eindeutige Klärung des Sachverhaltes unbedingt erforderlich.

8.4 Einfluss der Müllqualität auf Schlacken aus der Abfallverbrennung

Die Schlacken aus der Abfallverbrennung repräsentieren den (oxidierten) Inertanteil der verbrannten Abfälle. Folglich ist davon auszugehen, dass ein Zusammenhang zwischen den verbrannten Abfällen und den Eigenschaften der Schlacke besteht.

Die Ausführungen in diesem Abschnitt beschränken sich auf die von Betreibern in der Umfrage zur Verfügung gestellten Informationen. In der Literatur wurden zu wenige Aussagen über den Zusammenhang zwischen dem Abfallinput und den Eigenschaften der Schlacke gefunden, so dass eine Auswertung nicht möglich gewesen ist.

Für die Untersuchung zu den Auswirkungen des Anlageninputs auf die Schlacke wurden im Rahmen der Umfrage die Anteile der unterschiedlichen Abfallarten abgefragt, die in den jeweiligen Anlagen verbrannt werden. Unterschieden wurden Hausmüll, Sperrmüll, Gewerbeabfall, DSD-Sortierreste, heizwertreiche MBA- Fraktion und Sonstiges. Außerdem wurden weitere Informationen zum Abfallinput und zum Umgang mit den Abfällen der jeweiligen Standorte gesammelt. Für Details wird auf den Fragebogen im Anhang verwiesen.

Zu den Anteilen der verbrannten Abfallfraktionen wurden von allen an der Umfrage beteiligten Anlagen Angaben gemacht; diese sind in Abbildung 41 graphisch dargestellt.

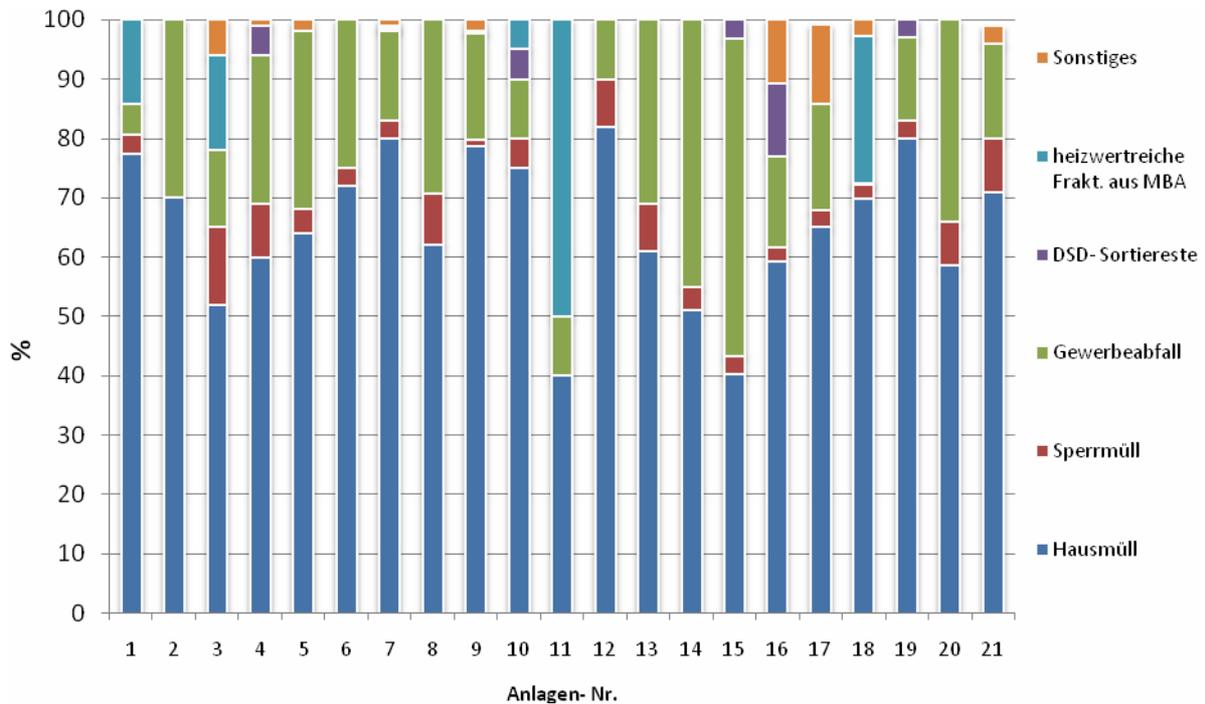


Abbildung 41: Mittlere Abfallzusammensetzung der an der Umfrage beteiligten Abfallverbrennungsanlagen

Aus Abbildung 41 ist zu entnehmen, dass die Fraktion Hausmüll bei 19 der 21 Anlagen mit 51 % bis 82 % den größten Anteil am Abfallinput darstellt. Ausnahmen bilden die Anlage 15 mit Gewerbeabfall als größtem Anteil und Anlage 11, wo die Hälfte des verbrannten Abfalls aus der heizwertreichen Fraktion der mechanisch biologischen Abfallbehandlung (MBA) besteht. Letztere Fraktion wird in weiteren vier Anlagen mit nennenswerten Anteilen und in zwei weiteren Anlagen in sehr geringem Maße mit verbrannt.

Die in Abbildung 41 dargestellten Daten zeigen ferner, dass an 20 Standorten Gewerbeabfall den zweitgrößten Anteil mit etwa 20 % darstellt. Sperrmüll wird in 19 Anlagen mit einem minimalen Anteil von 1 % und einem maximalen Anteil von 13 % am Abfallinput der Verbrennung zugeführt. DSD- Sortierreste werden nur in 6 Anlagen verbrannt; der Anteil am Gesamtinput liegt im Durchschnitt bei 4 %. Unter Sonstiges wurden im Rahmen der Umfrage von 8 Anlagen u. a. Klärschlämme, Störstoffe aus Kompostierung, gemischte Verpackungen bzw. "sonstige Abfallarten" mit insgesamt durchschnittlich 5 % angegeben.

Als mechanische Vorbehandlung für die zu verbrennenden Abfälle gaben zwölf Anlagen die Durchmischung mittels Krananlage an; vier dieser Anlagen setzten einen Shredder zur Zerkleinerung von Sperrmüll vor der Zugabe in den Müllbunker ein. An einem Standort wird Holz aussortiert, das mit dem Sperrmüll zur Anlage kommt. Die restlichen 9 Anlagen gaben an, keine mechanische Vorbehandlung bzw. Homogenisierung des Abfalls durchzuführen. Es ist davon auszugehen, dass die Durchmischung des Abfalls mit der Krananlage auch hier durchgeführt wird.

Der Heizwert des verbrannten Abfalls beeinflusst u. a. die Gutbetttemperatur auf dem Rost; neben der mechanischen Vorbehandlung kommt daher dem Heizwert im Hinblick auf die Schlackeeigenschaften eine Bedeutung zu.

Zum durchschnittlichen Heizwert des gesamten Abfallinputs wurden ebenfalls von allen Anlagen im Rahmen der eigenen Umfrage Angaben gemacht. Wie aus Abbildung 42 zu entnehmen ist, schwankt der Heizwert bei den 21 Anlagen zwischen 9 und 11,3 MJ/kg. Der durchschnittliche Heizwert wurde zu 10 MJ/kg berechnet.

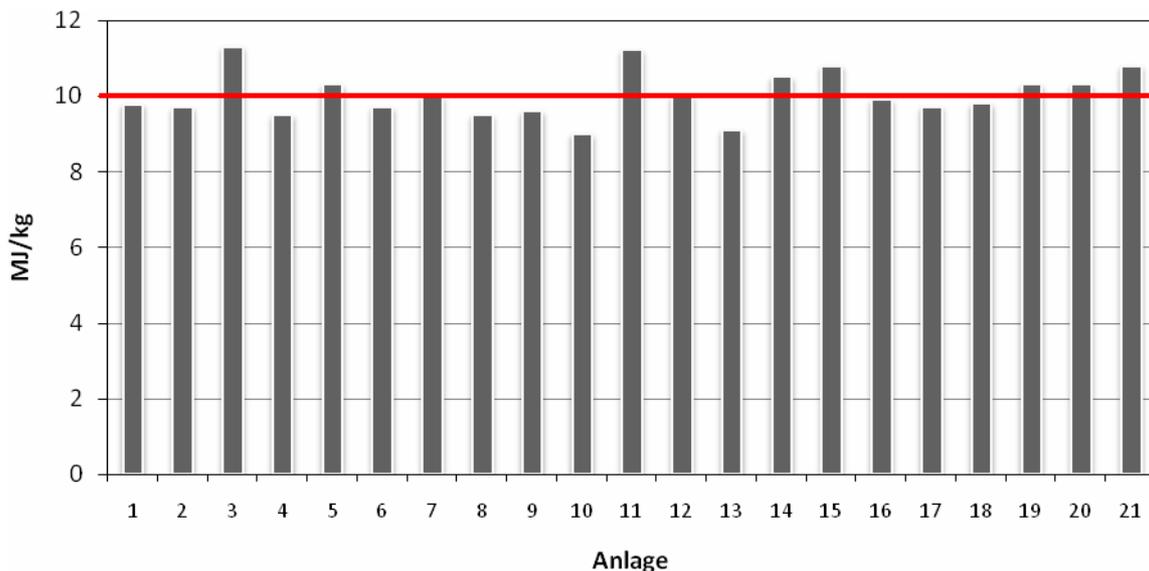


Abbildung 42: Durchschnittliche Heizwerte der an der Umfrage beteiligten Anlagen und durchschnittlicher Heizwert aller Anlagen (rote Linie)

Zu den von Pfrang-Stotz zur Verfügung gestellten Daten sind in dem Forschungsbericht [PFRANG-STOTZ 2005] die durchschnittlichen Heizwerte des Abfallinputs der 11 im Rahmen dieses Forschungsprojektes untersuchten Müllverbrennungsanlagen angegeben. Die Heizwerte liegen mit 9,5 bis 11,4 MJ/kg im gleichen Bereich wie die Werte aus der eigenen Umfrage, der durchschnittliche Heizwert der 11 Anlagen beträgt 10,4 MJ/kg.

Für eine erste Untersuchung der Auswirkungen des Anlageninputs auf die Schlacke wird der spezifische Schlackeanfall betrachtet. Geht man von den allgemeinen Eigenschaften der Abfälle aus, so ist zu erwarten, dass Hausmüll und Gewerbeabfälle im Vergleich zu den anderen Fraktionen relativ hohe Inertanteile aufweisen und folglich zu einem höheren spezifischen Schlackeanfall führen. In Abbildung 43 ist der spezifische Schlackeanfall in Abhängigkeit vom Hausmüll- und Gewerbeabfallanteil (Summe) dargestellt.

Aus Abbildung 43 ist der erwartete Zusammenhang nicht zu entnehmen. Mögliche Ursachen könnten unterschiedliche Zeithorizonte der Daten für das spezifische Schlackeaufkommen und für die Brennstoffzusammensetzung sein. Um einen signifikanten Zusammenhang zwischen dem spezifischen Schlackeaufkommen und den Anteilen einzelner Müllfraktionen nachweisen zu können, muss daher die Zusammensetzung der einzelnen Abfallfraktionen bekannt sein.

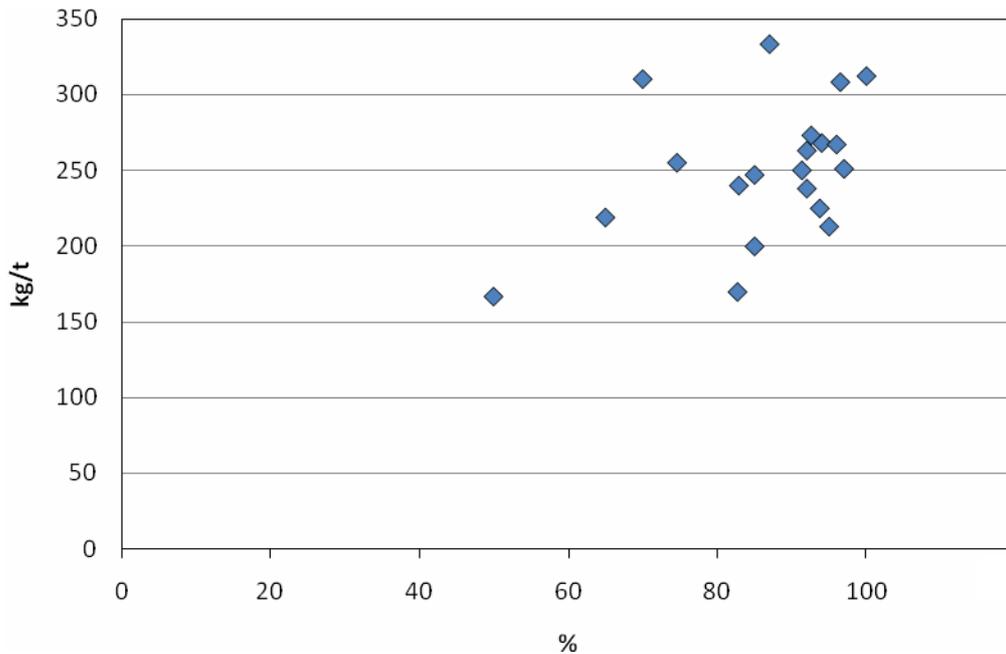


Abbildung 43: Spez. Schlackeaufkommen in Abhängigkeit von Summe aus Hausmüllanteil und Gewerbemüllanteil (Daten aus eigener Umfrage)

Ein Vergleich der Eigenschaften von Schlacken aus Anlagen mit mechanischer Vorbehandlung mit denen aus Anlagen ohne Vorbehandlungsmaßnahmen zeigte keine Auffälligkeiten. Eine einfache mechanische Vorbehandlung, z.B. durch Einsatz eines Schredders am Standort, hat demnach keinen Einfluss auf die Eigenschaften der Schlacke.

Des Weiteren sollte ein Zusammenhang zwischen den in diesem Abschnitt genannten Abfalleigenschaften und den Daten zur chemischen Zusammensetzung von Schlacken aus Abschnitt 8.2 untersucht werden. Da von den Anlagen im Rahmen der Umfrage keine Angaben über die chemische Beschaffenheit gemacht wurden, und zu den Literaturdaten wiederum Angaben über die Inputeigenschaften fehlten, konnten lediglich die Angaben über Feststoffeigenschaften wie TOC und Glühverlust und die Feststoffgehalte der Schwermetalle in den Rohschlacken mit den Abfallinputeigenschaften in Beziehung gebracht werden.

Einschränkend muss erwähnt werden, dass die ermittelten Werte für die Eigenschaften des Abfallinputs durchschnittliche Werte eines Jahres repräsentieren. Die Daten zu den Feststoffeigenschaften der Rohschlacken aus den einzelnen Analysen sind ganz bestimmten Abfallzusammensetzungen zuzuordnen, die auf Grund der relativ großen Schwankungen im angelieferten allerdings Müll unbekannt sind.

Vor diesem Hintergrund überrascht es nicht, dass aus den vorliegenden Daten kein Zusammenhang zwischen den Eigenschaften der Rohschlacke und dem Abfallinput abgeleitet werden konnte. Weiterhin war der vorhandene Datenbestand auf Grund des schlechten Rücklaufes in der Umfrage zu gering, um repräsentative Tendenzen daraus abzubilden.

Somit ist abschließend festzuhalten, dass weder signifikante noch tendenzielle Zusammenhänge zwischen Abfallinput- und Feststoffeigenschaften von MVA-Schlacken festgestellt werden konnten.

8.5 Einfluss der Feuerungstechnik auf die Schlacke

Die Qualität der Schlacke wird, wie in Abschnitt 6.5 erläutert, auch durch die Dimensionierung des Rostsystems, die Feuerraumgestaltung und den Anlagenbetrieb beeinflusst. Wichtige Kenngrößen bei der Auslegung von Rostsystem und Feuerraum sind die thermische Rostbelastung und die thermische Feuerraumbelastung.

Die thermische Rostbelastung berechnet sich mit der Formel

$$q_R = \frac{D \cdot H_u}{A_R}$$

mit	q_R	= thermische Rostbelastung	(MW/m ²)
	D	= Abfalldurchsatz	(t/h)
	H_u	= mittlerer unterer Heizwert Abfallinputs	(MJ/kg)
	A_R	= Rostfläche	(m ²).

Für die thermische Feuerraumbelastung gilt

$$q_F = \frac{D \cdot H_u}{V_F}$$

mit	q_F	= thermische Feuerraumbelastung	(MW/m ³)
	V_F	= Feuerraumvolumen	(m ³).

Außerdem ist die Abhängigkeit der Schlackebeschaffenheit von der Verweilzeit des Abfalls auf dem Rost und von der spez. Luftmenge, d.h. die Menge (primär) zugeführter Luft, zu untersuchen. Die spezifische Luftmenge berechnet sich mit der Formel

$$l_P = \frac{L_P}{D}$$

mit	l_P	= spezifische Luftmenge	(m ³ /kg)
	L_P	= Primärluftzuführung	(m ³ /h).

In Tabelle 7 sind die durchschnittlichen Verfahrensparameterwerte der jeweiligen Anlagen zusammengefasst, die aus den Anlagedaten des Fragebogens der Umfrage berechnet wurden.

Der Großteil der Anlagen verwendet einen Vorschubrost (14). Drei Anlagen werden mit Walzenrost und drei weitere mit Rückschubrost betrieben. Bei einer Anlage wurden zwei alte Verbrennungslinien mit Rückschubrost durch eine weitere Verbrennungslinie mit Vorschubrost ergänzt. Auch bei der Feuerungsart gibt es Anlagen, die durch eine Erweiterung um eine zusätzliche Verbrennungslinie oder Erneuerung alter Linien verschiedene Konzepte nebeneinander vorweisen. An drei Standorten arbeiten Verbrennungslinien sowohl nach dem Mittelstromprinzip als auch nach dem Gleichstromprinzip. Von den anderen Anlagen verbrennen neun nach dem Mittelstromprinzip, Gleichstrom- und Gegenstromfeuerung findet in jeweils vier Anlagen statt.

Tabelle 7: Durchschnittliche Verfahrensparameter im Regelbetrieb (Eigene Umfrage)

Anlage	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Anzahl Verbrennungslinien (VB)	4	3	3	2	3	2	3	2	2	3	4
Rostsystem (Anzahl VB)	Walzenrost	Vorschubrost	Vorschubrost	Vorschubrost	Vorschubrost	Vorschubrost	Rückschubrost	Rückschubrost	Vorschubrost	Vorschubrost	Vorschubrost
Feuerrungsart (Anzahl VB)	Mittelstrom (3), Gleichstrom (1)	Mittelstrom	Mittelstrom	Mittelstrom	Gleichstrom	Mittelstrom	Mittelstrom	Gleichstrom	Mittelstrom	Mittelstrom	Gegenstrom
therm. Rostbelastung [MW/m ²]	1,63	0,85	0,77	0,76	k.A.	k.A.	0,79	1,18	0,79	0,63	0,92
thermische Feuerraumbelastung [MW/m ³]	0,35	k.A.	0,22	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	0,63	0,21	0,21	k.A.
mittlere Brennstoffverweilzeit [min]	36,3	60	70	k.A.	60	k.A.	60	20	55	25	60
spez. Luftmenge [m ³ /kg]	k.A.	k.A.	k.A.	2,33	k.A.	k.A.	2	2,35	2,74	2,29	k.A.
Anlage	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	
Verbrennungslinien	2	2	1	2	3	4	3	4	4	3	
Rostsystem (Anzahl VB)	Vorschubrost	Vorschubrost	Vorschubrost	Vorschubrost	Rückschubrost (2), Vorschubrost (1)	Rückschubrost	Vorschubrost	Vorschubrost	Walzenrost	Walzenrost	
Feuerrungsart (Anzahl VB)	Gegenstrom	Gleichstrom	k.A.	Mittelstrom	Mittelstrom	Gegenstrom	Gegenstrom	Gleichstrom (2), Mittelstrom (2)	Gleichstrom	Gleichstrom (2), Mittelstrom (1)	
Thermische Rostbelastung [MW/m ²]	0,62	0,49	0,83	0,87	0,57	0,735	0,69	0,865	1,07	0,75	
thermische Feuerraumbelastung [MW/m ³]	k.A.	0,17	k.A.	k.A.	0,21	k.A.	0,15	0,24	0,2	k.A.	
mittlere Brennstoffverweilzeit [min]	35	105	k.A.	53	50	55	k.A.	63	45	40	
spez. Luftmenge [m ³ /kg]	2,8	2,9	4,8	4,99	k.A.	k.A.	4,07	2,31	k.A.	k.A.	

Wie Tabelle 7 entnommen werden kann, liegt die thermische Rostbelastung bei den Umfrageanlagen im Bereich von 0,49 MW/m² bis 1,63 MW/m² (Mittelwert: 0,85 MW/m²). Für die thermische Feuerraumbelastung wurde ein Bereich von 0,15 bis 0,63 MW/m³ errechnet (Mittelwert: 0,25 MW/m³). Bei 17 Anlagen liegt die mittlere Brennstoff- bzw. Schlackeverweilzeit auf dem Rost im Bereich von 20 bis 105 Minuten. Die spezifischen Luftmengen konnten bei 11 Anlagen berechnet werden. Sie variieren bei diesen Anlagen im Bereich von 2 bis 5 m³/kg (Mittelwert: 2,89 m³/kg).

Bei diesen untersuchten Einflussgrößen der Feuerungstechnik auf die Beschaffenheit der Schlacke waren ebenfalls keine signifikanten Zusammenhänge feststellbar. Selbst die in Abschnitt 6.5 genannten Einflüsse auf den Ausbrand und damit auf den Glühverlust und den TOC konnten nicht bestätigt werden. Dies lag zum einen an der geringen Umfragebeteiligung und zum anderen an der unterschiedlichen Beschaffenheit und der geringen Anzahl an Daten.

Um Zusammenhänge zwischen der Schlackequalität und der Feuerraumgeometrie zu ermitteln, wurden die eigenen Daten mit Daten von Pfrang-Stotz gemeinsam betrachtet.

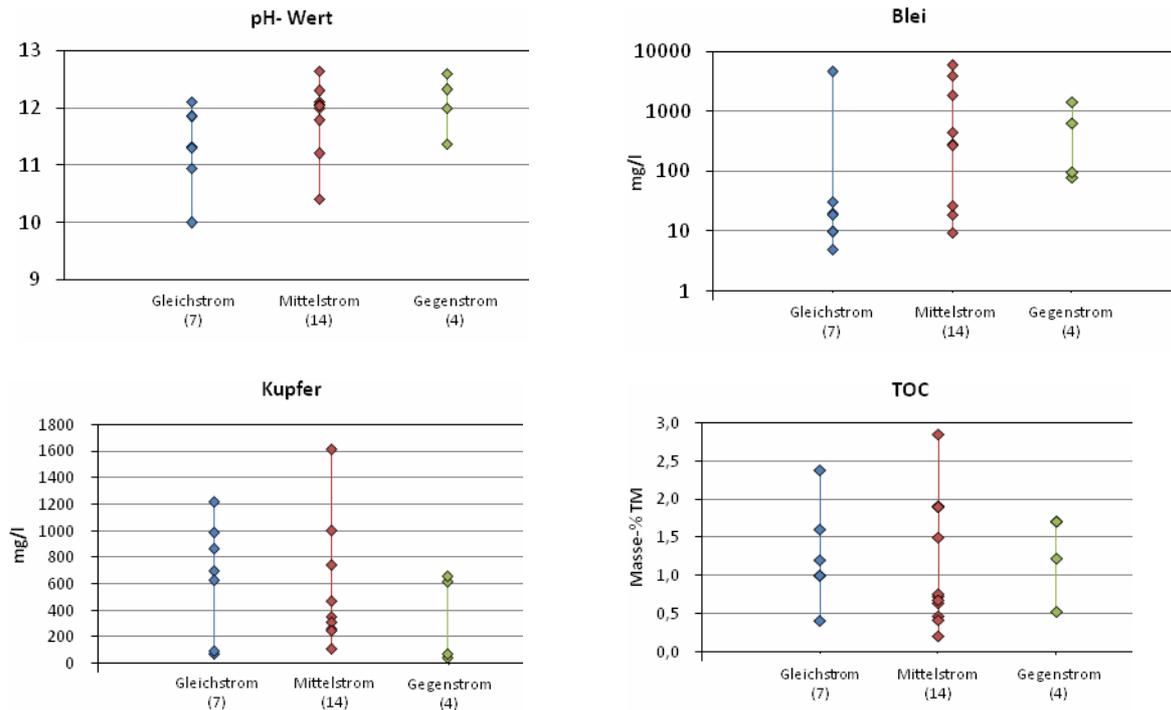


Abbildung 44: Ausgewählte Eluat- und Feststoffparameter in Abhängigkeit von der Feuerraumgeometrie (nähere Erläuterung siehe Text)

In Abbildung 44 ist ein Vergleich der Schwankungsbreiten von TOC und ausgewählten Elutionsparametern (pH-Wert, Eluatwerte für Blei und Kupfer) für die verschiedenen Feuerungsarten dargestellt. In der unteren Beschriftung der Diagramme ist in Klammern die Anzahl der jeweils einfließenden Werte angegeben.

Da bei den meisten Anlagen der Feuerraum nach dem Mittelstrom-Prinzip ausgelegt ist, lagen für diese Feuerungsart die meisten Werte vor. Die Werte für die drei unterschiedlichen Feuerraumgeometrien liegen etwa im gleichen Bereich.

Um repräsentative Aussagen über unterschiedliche Einflüsse der verschiedenen Gasstromführungen auf die Schlackequalität machen zu können, hätten mehr Daten zu den Schlackeeigenschaften von Gleich- und Gegenstromanlagen vorhanden sein müssen. Weiterhin sollten alle anderen auf die Werte Einfluss nehmenden Größen, wie Müllzusammensetzung, Art der Abfallvorbehandlung, die angewandten Probenahme- und Analyseverfahren, vergleichbar sein.

Es konnte kein Zusammenhang zwischen der Feuerraumgeometrie und den Eluat- und Feststoffeigenschaften von Schlacken abgeleitet werden. Die Diagramme in Abbildung 44 zeigen im Gegenteil, dass der Einfluss der Feuerraumgeometrie in Relation zu den möglichen Schwankungsbreiten der einzelnen Parameter keinen signifikanten Einfluss auf die Beschaffenheit der Schlacke hat.

Ergänzend zu Feuerraumgeometrie kann die Konstruktion des Rostes einen Einfluss auf die Schlackequalität haben. In Abbildung 45 sind die Befunde zwischen der Rostart und ausgewählten Eluat- und Feststoffeigenschaften von Schlacken dargestellt.

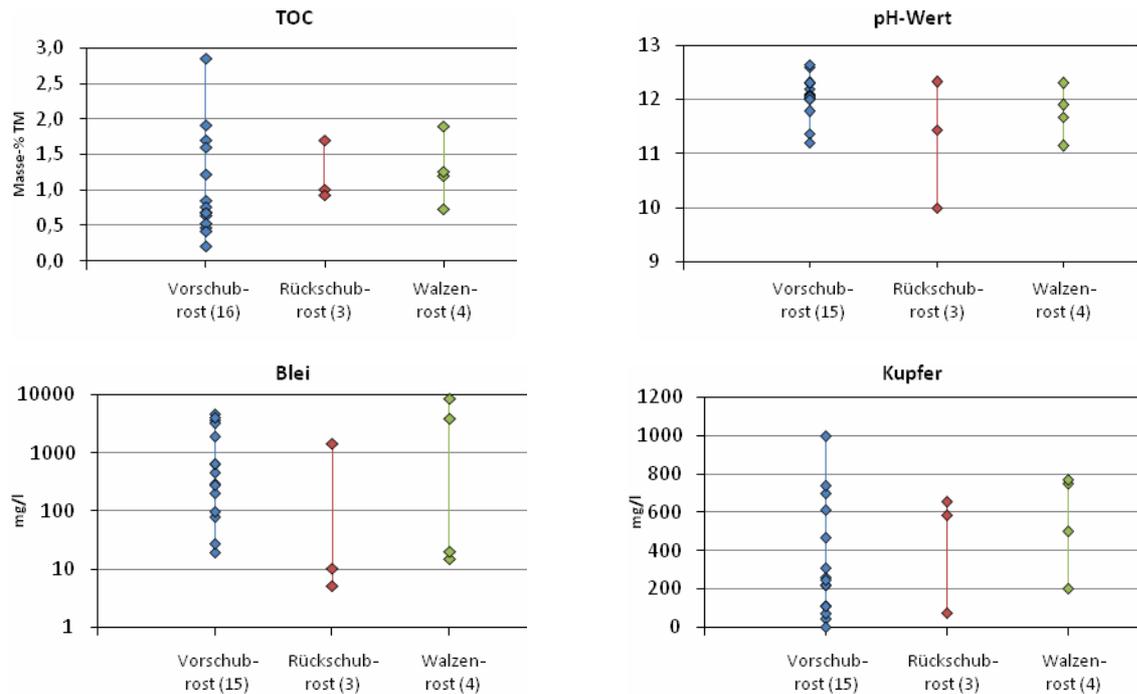


Abbildung 45: Ausgewählte Eluat- und Feststoffparameter in Abhängigkeit von der Art des Rostsystems (nähere Erläuterung siehe Text)

In den Graphiken der Abbildung 45 beschreiben in der unteren Beschriftung die Werte in Klammern die Anzahl der jeweils einfließenden Werte. Der Großteil der Anlagen verbrennt seinen Abfall auf einem Vorschubrost, so dass für dieses Rostsystem die meisten Werte zu den Schlackeeigenschaften vorhanden waren.

Ein Vergleich der Daten in den Diagrammen der Abbildung 45 zeigt, dass für TOC, den pH-Wert, die Kupferkonzentration im Eluat und Bleikonzentration im Eluat die Werte für alle Rostsysteme etwa im gleichen Bereich liegen.

Abschließen ist somit festzustellen, dass im Rahmen der durchgeführten Arbeiten kein Zusammenhang zwischen der Rostart und den Eluat- und Feststoffeigenschaften von Schlacken abgeleitet werden kann.

8.6 Schlacke – Aufbereitung und Kosten

An großtechnischen Abfallverbrennungsanlagen existieren weitere betriebliche Maßnahmen, um die Qualität der Schlacke zu verbessern. In der Literatur werden zu dieser Thematik nur sehr wenige aktuelle Informationen angegeben. Aus diesem Grund beschränken sich die folgenden Ausführungen auf die durchgeführte Umfrage.

Zum weiteren Verbleib der Schlacke wurden in der Umfrage von allen 21 Anlagen Angaben gemacht. Nach dem Abkühlen im Entschlacker führt nur eine der 21 Anlagen eine zusätzliche Schlackewäsche durch. Nur an diesem Standort wird selbstständig eine weitergehende Aufbereitung und Lagerung am Standort komplett durchgeführt. Die Lagerungsdauer der Schlacke dieser Anlage beträgt insgesamt 3 Monate, in denen die Schlacke die Hälfte der Zeit in einer Halle und danach im Freien gelagert wird. Da von dieser Anlage keine Eluatwerte vorlagen, können zu den Auswirkungen der Schlackewäsche und den genannten Alterungs- und Aufbereitungsmaßnahmen auf die Schadstoffmobilität keine Aussagen getroffen werden.

Die restlichen 20 Anlagen überlassen die Aufbereitung einem externen Dienstleister. Davon nehmen im Vorfeld drei Anlagen am Standort eine Entschrottung mittels Überbandmagnet

vor, die restlichen 17 Anlagen gaben an, keine mechanische Aufbereitung am Standort durchzuführen.

Zur Art und Umfang der Lagerung gaben vier Anlagen eine Zwischenlagerung von ein bis fünf Tagen im Schlackebunker oder überdachten Halden im Freien und drei Anlagen eine Zwischenlagerungsdauer von einem halben bis ganzen Monat in Mietenform im Freien oder in überdachten Halden an. 13 Anlagen geben ihre Schlacke direkt an einen externen Aufbereiter weiter.

Umfassendere Angaben zum Umgang der Betreiber mit der Schlacke hat die "Interessengemeinschaft der thermischen Abfallbehandlungsanlagen in Deutschland e.V." (ITAD) ermittelt, die 2005 unter den Mitgliedern Daten zu Anfall, Aufbereitung und Entsorgung von Schlacke erhoben hatte. Die ITAD hat die Ergebnisse dieser Umfrage, an der sich 54 der 67 Mitglieder beteiligt hatten, für diese Arbeit zur Verfügung gestellt. An 45 Anlagen wird die Schlacke extern aufbereitet, an 15 Anlagen wird die Schlacke selbst aufbereitet. Zum Umfang der Aufbereitung gaben 51 Anlagen eine Fe- Entschrottung, 45 Anlagen eine Ne- Entschrottung und 24 Anlagen eine Windsichtung an. Für die Rohschlacke wurde als einziger Entsorgungsweg die Verwertung mittels Einbau im Versatz aufgeführt. Für die aufbereitete und gealterte Schlacke wurde als Beseitigungsform die Ablagerung auf Deponien und als Verwertungsform die Anwendung im Straßen- und Wegebau ermittelt. Konkrete Angaben über die mengenmäßige Verteilung der einzelnen Entsorgungswege wurden nicht mitgeteilt.

Faulstich gab in [EUWID 11 2007] für das Jahr 2005 eine für bauliche Zwecke genutzte Schlackemenge von 2,06 Mio. Tonnen an. Davon wurden rund 1,87 Mio. Tonnen im Straßenbau verwertet. Insgesamt fielen 2005 4,1 Mio. Tonnen Schlacke an. Im Deponiebau wurden 400.000 Tonnen eingesetzt und im Bergversatz und "auf anderen Wegen" würden jeweils 500.000 Tonnen verwertet.

Befragungen bei Aufbereitern ergaben, dass die hohen Verwertungsmengen seit 2005 rückläufig sein müssen. Als Begründung wurde das in diesem Jahr in Kraft getretene Ablagerungsverbot für unvorbehandelter Abfälle (Siehe Abschnitt 3.4) und die daraus resultierende Schließung einer Vielzahl von Deponien genannt. Dadurch ist der Bedarf an Schlacke im Deponiebau (Verwertung) gestiegen. Außerdem werden die vorhandenen Deponiekapazitäten bis zur Schließung der Deponien ausgenutzt. Dies ist ökonomisch effizienter für die Betreiber der Müllverbrennungsanlagen, da die Aufbereitung weniger umfangreich und damit auch weniger kostenintensiv ist. Ein verstärkter Einsatz von Schlacken aus der Abfallverbrennung im Deponiebau ergab sich auch aus einer etwas älteren Untersuchung in Baden-Württemberg [LFU BW 2004].

Nur 10 Anlagen machten zu den Entsorgungskosten von Schlacken Angaben, diese betragen zwischen 5 und 40 €/pro Tonne. Die durchschnittlichen Entsorgungskosten liegen bei 20 €/pro Tonne Schlacke. In Gesprächen mit Betreibern von Abfallverbrennungsanlagen, Schlackeaufbereitern und Behörden konnte ermittelt werden, dass zum aktuellen Zeitpunkt eine Beseitigung tendenziell kostengünstiger ist als eine Verwertung von Schlacken. Die Anforderungen an die Schlackeeigenschaften sind im Fall einer Beseitigung geringer (Siehe Abschnitt 3.4, AbfAbIV und DepV) und somit auch der notwendige Umfang der Aufbereitungsmaßnahmen.

9 Zusammenfassung

Aktuell ist die Verwertung von Abfällen unter dem Gesichtspunkt einer nachhaltigen Entwicklung insbesondere in Hinblick auf Ressourcenschonung von großer gesellschaftlicher Bedeutung. Die bei der Hausmüllverbrennung anfallenden Schlacken stellen einen erheblichen Massestrom dar, der sich im Fall einer Verwertung als essentieller Rohstoffersatz anbietet.

Falls die Produktqualität der Schlacken im Vergleich zu natürlichen Baustoffen keine wesentlichen Nachteile aufweist, können Schlacken auf Grund ihrer mineralogischen Zusammensetzung als ein kostengünstiger Ersatzstoff in der Bauindustrie genutzt werden. Auf der anderen Seite ist zu berücksichtigen, dass die Schlacke bei der Abfallverbrennung als eine wesentliche Senke für viele der im Abfall enthaltenen Schadstoffe gilt. Aus diesem Grund kommt der Qualität der Schlacken insbesondere im Fall einer Verwertung eine besondere Bedeutung zu. Die Qualität der Schlacken wird sowohl von der Abfallzusammensetzung als auch von der Verbrennungstechnologie beeinflusst.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit war die Erfassung der bei der Hausmüllverbrennung in Deutschland anfallenden Schlackemengen sowie deren Qualität im Vergleich zu den derzeit geltenden rechtlichen Vorgaben zu ermitteln und zu beurteilen.

Für die Erfassung der Schlackequalität wurden verschiedene Datenquellen herangezogen:

- Umfrage bei den Betreibern von Abfallverbrennungsanlagen mit Fragebogenaktion
- Allgemeine Literaturrecherche
- Messdaten aus einem FZK-Projekt (Pfrang-Stotz)
- Umfrage bei Schlackeaufbereitern
- Kontakte zu Behörden

Die Auswertung der Umfrageergebnisse ergab für 2007 ein Schlackeaufkommen von 4,5 Mio. Tonnen für die insgesamt 72 Müllverbrennungsanlagen in Deutschland. Dieser Wert erscheint im Vergleich zu 2005, als in 67 Anlagen 4,1 Mio. Tonnen MVA-Schlacke produziert wurde [EUWID 11 2007], als schlüssig.

Aus den Daten zum Schlackeaufkommen konnte ein durchschnittlicher spezifischer Schlackeanfall von 250 kg pro Tonne verbrannten Abfall berechnet werden. Im Vergleich zu dem für 2005 berechneten durchschnittlichen Wert von 248 kg pro Tonne erscheint diese spez. Schlackemenge ebenfalls als plausibel.

Ein Vergleich der spezifischen Schlackeaufkommen der letzten 10 Jahre zeigt eine leichte Verringerung des spezifischen Schlackeanfalls. Als eine mögliche Ursache wurden verstärkte Recyclingmaßnahmen identifiziert. Hierbei wurden verstärkt inertstoffreiche Abfallfraktionen einer Verwertung zugeführt.

Aus allen zur Verfügung stehenden Daten konnte ein Gesamtbild der Schlackequalität ermittelt werden. Der Vergleich der einzelnen Parameter von Rohschlacken und gealterten Schlacken zeigt, dass die Schwankungsbreiten der Rohschlacken größer sind als die der aufbereiteten und gealterten Schlacken. Die Ursache für diesen Befund ist eine homogenisierende Wirkung der Aufbereitungsmaßnahmen.

Die Beurteilung der Schlackequalität erfolgte in Bezug zu den derzeit gültigen rechtlichen Vorgaben. Diese Vorgaben, festgeschrieben in der LAGA M19 und LAGA M20, werden für die Feststoffparameter bis auf wenige Ausnahmen von den Rohschlacken und den abgelag-

gerten Schlacken unterschritten. Nur der TOC-Gehalt zeigte teilweise erhebliche Überschreitungen bezüglich des geforderten Grenzwertes von 1 Masse-%; dies gilt insbesondere für die Daten zur Rohschlacke aus der Umfrage. Als wesentliche Ursache könnte die in den meisten Anlagen (Umfrageergebnisse) gängige Praxis einer Zusammenführung des Rostdurchfalls mit der Schlacke sein.

Die durch die LAGA M20 vorgeschriebenen Grenzwerte für Eluatparameter von 3 Monate gealterten und aufbereiteten Schlacken werden im Allgemeinen bis auf wenige Ausnahmen gut eingehalten. Die Umfrageergebnisse und die Literaturdaten lassen den Schluss zu, dass die sichere Einhaltung der LAGA-Grenzwerte für Blei, Cadmium und Kupfer jedoch nicht immer gewährleistet ist. Für eine abschließende Beurteilung dieses Befundes ist eine detailliertere Datenerhebung unter Beteiligung aller deutschen Müllverbrennungsanlagen dringend zu empfehlen.

Bei der Untersuchung der Abhängigkeit der Schlackeeigenschaften von der Feuerungstechnik und Müllqualität konnten keine Zusammenhänge identifiziert werden. Eine Ursache für dieses Ergebnis ist wiederum in der unzureichenden Datenlage zu sehen. Folglich besteht zu dieser Fragestellung ebenfalls weiterer F&E-Bedarf.

Die verwendeten Datensätze aus der Umfrage, der Literatur und von Pfrang-Stotz zeigen ungefähr gleiche Schwankungsbreiten, sowohl bei den Rohschlacken als auch bei den gealterten und aufbereiteten Schlacken. Berücksichtigt man, dass die einzelnen Werte aus der Umfrage maximal 2 Jahre, die Daten von Pfrang-Stotz etwa 3 Jahre und einige Literaturdaten bis zu 20 Jahre alt sind, so weist dies darauf hin, dass sich die Schadstoffgehalte im Feststoff und im Eluat von Schlacken aus der Abfallverbrennung in den letzten Jahren nicht wesentlich verändert haben.

Die Angaben zum Umgang mit der Schlacke aus der Umfrage dokumentieren, dass der Großteil der Anlagenbetreiber die Lagerung und Aufbereitung in die Hände externer Firmen geben. Die Kosten für die Schlackeverwertung liegen aktuell im Bereich von 5 bis 40 EUR pro Tonne.

Zukünftig werden sich die Anforderungen an die Verwertung von Schlacken ändern, denn eine neue bundesweite Verordnung wird die derzeit verwendeten Anforderungen der LAGA ersetzen.

10 Literaturverzeichnis

- [4. BIMSCHV 1997] Vierte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes, 4. BImSchV - Verordnung über genehmigungsbedürftige Anlagen. Fassung vom 14. März 1997.
- [9. BIMSCHV 1992] Neunte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes, 9. BImSchV - Verordnung über das Genehmigungsverfahren. Fassung vom 29. Mai 1992.
- [12. BImSchV 2005] Zwölfte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes, 12. BImSchV - Störfall-Verordnung, Fassung vom 8. Juni 2005.
- [17. BIMSCHV 2003] Siebzehnte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes, 17. BImSchV - Verordnung über die Verbrennung und die Mitverbrennung von Abfällen. Fassung vom 14. August 2003.
- [ABFABLV 2001] Verordnung über die umweltverträgliche Ablagerung von Siedlungsabfällen, AbfAblV – Abfallablagerungsverordnung. Fassung vom 20. Februar 2001.
- [ABWV 2004] Verordnung über Anforderungen an das Einleiten von Abwasser in Gewässer, AbwV – Abwasserverordnung. Fassung vom 17. Juni 2004.
- [ACHTERNBOSCH 2002] Achternbosch, M.; Richers, U.: "Materials Flows and Investment Costs of Flue Gas Cleaning Systems of Municipal Solid Waste Incinerators". Forschungszentrum Karlsruhe, Wissenschaftliche Berichte, FZKA 6726, August 2002.
- [AVV 2001] Verordnung über das Europäische Abfallverzeichnis AVV - Abfallverzeichnis-Verordnung. Fassung vom 10. Dezember 2001.
- [ANGENEND 1990] Angenend, F.J.; Trondt, L.: „Schadstoffinput – Schadstoffoutput, Bilanzierung bei der Müllverbrennung am Beispiel des Müllheizkraftwerks Essen-Karnap". VGB Kraftwerkstechnik 70 (1990) Heft 1. S. 36-72.
- [BAYLFU 2002] Bayerisches Landesamt für Umweltschutz: "Verwertung von MV-Rostschlacke in Bauvorhaben". Abschlussbericht, Augsburg, 2002. Heruntergeladen im Mai 2007: [http://www.abfallratgeber.bayern.de/arba/allglfu.nsf/02C69A44A936F1D7C1256EB4002C9958/\\$file/ab_rost_bau.pdf](http://www.abfallratgeber.bayern.de/arba/allglfu.nsf/02C69A44A936F1D7C1256EB4002C9958/$file/ab_rost_bau.pdf).
- [BBODSCHG 1998] Gesetz zum Schutz vor schädlichen Bodenveränderungen und zur Sanierung von Altlasten (Bundes-Bodenschutzgesetz - BBodSchG). Fassung vom 17. März 1998.
- [BBODSCHV 1999] Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV). Fassung vom 12. Juli 1999.

- [Becker 2007] R. Becker, R.; Donnevert, G.; Römbke, J.: "Biologische Testverfahren zur ökotoxikologischen Charakterisierung von Abfällen" Forschungsprojekt im Auftrag des Umweltbundesamtes. Förderkennzeichen 206 33 302. November 2007.
- [BELEVI 1998] Belevi, H., "Environmental Engineering of Municipal Solid Waste Incineration". Habilitationsschrift. Zürich, Juni 1998.
- [BELEVI 2000a] Belevi H., Langmeier M.: " Factors Determining the Element Behavior in Municipal Solid Waste Incinerators. 2. Laboratory Experiments". Environmental Science & Technology 34 (2000) S. 2507-2512.
- [BELEVI 2000b] Belevi H., Moench H.: "Factors Determining the Element Behavior in Municipal Solid Waste Incinerators. 1. Field Studies". Environmental Science & Technology 34 (2000) S. 2501-2506.
- [BERTRAM 2003] Bertram, H.U.: "Aktueller Stand der Überarbeitung der LAGA-Mitteilung 20". Hannover, 2003. Heruntergeladen am 15.04.2007: http://laga-online.de/laganeu/images/stories/pdfdoc/allgemein/vortrag_bertram.pdf.
- [BERTRAM 2004a] Bertram, H.U., Bannick, C.G.: "Blick zurück ohne Zorn, Die LAGA- Mitteilung 20 – Möglichkeiten und Grenzen", TerraTech 13 (2004) Heft 5. S. 4-7.
- [BERTRAM 2004b] Bertram, H.U. et al.: "Ableitung der Feststoffwerte für die Technische Regel Boden der LAGA- Mitteilung 20". TerraTech 13 (2004) Heft 6. S. 7-11.
- [BILITEWSKI 1991] Bilitewski, B.; Härdtle, G.; Marek, K.: "Abfallwirtschaft". Springer Verlag Berlin, 1991.
- [BIMSCHG 2002] Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge, BImSchG - Bundes-Immissionsschutzgesetz. Fassung vom 6. September 2002.
- [BMU 2005] Bundesumweltministerium, Referat WA II 4, „Statistiken und Graphiken – Zusammengestellt aus Daten des Statistischen Bundesamtes und Umweltbundesamtes“, Stand 1. Juni 2005. Heruntergeladen am 05.09.2007: http://www.bmu.de/files/abfallwirtschaft/downloads/application/pdf/siedlungsabfallentsorgung_statistik.pdf.
- [BREF WI 2006] European Commission: "Reference Document on the Best Available Techniques for Waste Incineration". August 2006.
- [CHIMENOS 2003] Chimenos, J.M.: "Short-term natural weathering of MSWI bottom ash as a function of particle size". Waste Management 23 (2003) S. Seite 887-895.
- [DEHOUST 2002] Dehoust, G. et al.: "Der Beitrag der thermischen Abfallbehandlung zu Klimaschutz, Luftreinhaltung und Ressourcenschutz".Darmstadt, 2002. Heruntergeladen am 23.06.2007: <http://www.oeko.de/oekodoc/75/2002-013-de.pdf>.

- [DEPV 2002] Verordnung über Deponien und Langzeitlager, DepV – Deponieverordnung. Fassung vom 24. Juli 2002.
- [DEPVERWV 2005] Verordnung über die Verwertung von Abfällen auf Deponien über Tage, DepVerwV – Deponieverwertungsverordnung. Fassung vom 25. Juli 2005.
- [DIN 38414-4] DIN 38414, Teil 4. "Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung; Schlamm und Sedimente (Gruppe S), Bestimmung der Eluierbarkeit mit Wasser (S 4)". Beuth-Verlag Berlin, 1984.
- [DIN 32645] DIN 32645. "Chemische Analytik; Nachweis-, Erfassungs- und Bestimmungsgrenze; Ermittlung unter Wiederholbedingungen; Begriffe, Verfahren, Auswertung". Beuth-Verlag Berlin, 1994.
- [DIN EN 12457-4] DIN EN 12457-4. "Charakterisierung von Abfällen - Auslaugung; Übereinstimmungsuntersuchung für die Auslaugung von körnigen Abfällen und Schlämmen - Teil 4: Einstufiges Schüttelverfahren mit einem Flüssigkeits-/Feststoffverhältnis von 10 l/kg für Materialien mit einer Korngröße unter 10 mm (ohne oder mit Korngrößenreduzierung)". Beuth Verlag Berlin, 2003.
- [DOETSCH 2004] Doetsch, P.: "Modifikation der Ableitungssystematik für die Eluat- Zuordnungswerte in den Technischen Regeln Boden". TerraTech 13 (2004) Heft 3-4. S. 4-9.
- [EIGHMY 1994] Eighmy, T.T. et al. "Particle petrogenesis and speciation of elements in MSW incineration bottom ashes" in: Goumans, J.J.J.M. et al.: "Environmental aspects of construction with waste materials" Elsevier Science B.V., Amsterdam, 1994.
- [EUWID 11 2007] Europäischer Wirtschaftsdienst (EUWID): "Rund 32 Mio. Tonnen Verbrennungsrückstände". EUWID Nr. 11 vom 13.03.2007, S. 9.
- [FREMGEN 2004] Fremgen, B., Meinken, K.: "Einsatz aufbereiteter MVA-Schlacke als Baustoff auf Deponien – noch möglich trotz DepVerwV?, Teil II". Müll und Abfall 36 (2004) Heft 8. S. 364-372.
- [GERVEN 2005] Van Gerven, T. et al.: "Carbonation of MSWI-bottom ash to decrease heavy metal leaching, in view of recycling". Waste Management 25 (2005) S. 291-300.
- [GROß 1993] Groß, G.; Eisbein, J.: "Das FosMelt- Verfahren - Eine Umweltfreundliche Alternative zur Deponierung von Rückständen aus Müllverbrennungsanlagen". Firmeninformation Fa. Messer Griesheim, Langenhagen, August 1993.
- [GRUNDWV 1997] Grundwasserverordnung - Verordnung zur Umsetzung der Richtlinie 80/68/EWG des Rates vom 17. Dezember 1979 über den Schutz des Grundwassers gegen Verschmutzung durch bestimmte gefährliche Stoffe". Fassung vom 18 März 1997.
- [HABECK 1985] Habeck-Tropfke, H.-H.: "Müll und Abfalltechnik". Werner-Verlag Düsseldorf, 1985.

- [HAHN 2004] Hahn, J.: "Vollständige Verwertung ist machbar", Umweltmagazin 34 (2004), Heft 6, S.10-12.
- [HENTSCHEL 1999] Hentschel, B.: "Vergleichende mineralogische und chemische Untersuchung an Rostschlacken aus Anlagen zur thermischen Abfallbehandlung". Shaker Verlag, Aachen, 1999.
- [HERDEN 2007] Herden, H. et al.: "Zusammensetzung und Eigenschaften von Rostaschen aus verschiedenen Müllheizkraftwerken". Müll und Abfall 39 (2007) Heft 2.S. 75-79.
- [HIRSCHMANN 1999] Hirschmann, G.: "Langzeitverhalten von Schlacken aus der thermischen Behandlung von Siedlungsabfällen". VDI Fortschrittbericht. Reihe 15, Umweltschutztechnik. Nr. 220. 1999.
- [HUBER 1996] Hubert, H. et al.: "Emissionsverhalten von MVA-Schlacke nach künstlicher Alterung". Endbericht der Abteilung Abfallwirtschaft der Universität für Bodenkultur Wien, September 1996. Heruntergeladen am 14.06.2007: http://www.naturlichwien.at/files/content_mistnewsdl_1/MVA-Schlacke_1996.pdf.
- [HUNSINGER 2007] Hunsinger, H. Persönliche Information. August 2007.
- [KERSTEN 1996] Kersten, M.: "Emissionspotential einer Schlackenmonodeponie ". Geowissenschaften 14 (1996) Heft 5. S. 180-185.
- [KEßLER 2006] Keßler, H.; Krause, S.; Schreck, J.; Wolf, R.: "Ziel 2020 - Abfallwirtschaft im Umbruch". Müll und Abfall 38 (2006) Heft 6. S. 316-322.
- [KISTERS 1988] Kisters, T.: "Schadstofffrei Abfallverbrennung". Broschüre der Babcock Anlagen AG, Krefeld, 1988.
- [KNORR 1999] Knorr et al.: "Rückstände aus der Müllverbrennung – Chancen für eine stoffliche Verwertung von Aschen und Schlacken". Erich Schmidt Verlag, Berlin, 1999.
- [KOZMIENSKY 1994] Thomé-Kozmiensky, K.: "Thermische Abfallbehandlung". EF-Verlag für Energie- und Umwelttechnik, Berlin, 1994.
- [KOHaupt] Kohaupt, U.: "Qualität in der Schlackeaufbereitung – Metallfreie Schlacke, reine Metalle". Heruntergeladen am 14.09.2007: http://www.technikwissen.de/libary/common/umwelt/Langfassung_Steinert.pdf.
- [KÖCHER 1991] Köcher, P.; Kley, G.; Freudenberg, A.; Faulstich, M., "Verfahren zur weitergehenden Inertisierung von Rückständen aus der Abfallverbrennung" in: Thomé-Kozmiensky, K.J.: "Müllverbrennung und Umwelt 5". EF- Verlag Berlin 1991.
- [KRASS 1999] Krass, K. et al.: "Anfall, Aufbereitung und Verwertung von Recycling- Baustoffen und industriellen Nebenprodukten im Wirtschaftsjahr 1997 – Teil 2: Industrielle Nebenprodukte" Straße u. Autobahn (1999) Heft 9. S. 473-478.

- [KRASS 2002] Krass, K. et al.: "Anfall, Aufbereitung und Verwertung von Recycling- Baustoffen und industriellen Nebenprodukten im Wirtschaftsjahr 1999 – Teil 2: Industrielle Nebenprodukte". Straße u. Autobahn (2002) Heft 2. S. 86-92.
- [KRASS 2004] Krass, K. et al.: "Anfall, Aufbereitung und Verwertung von Recycling- Baustoffen und industriellen Nebenprodukten im Wirtschaftsjahr 2001 – Teil 2: Industrielle Nebenprodukte". Straße u. Autobahn (2004) Heft 5. S. 22-52.
- [KRW-/ABFG 1994] Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Beseitigung von Abfällen, KrW-/AbfG - Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz. Fassung vom 27. September 1994.
- [LAGA M19 1994] Mitteilung 19 der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA). "Merkblatt zur Entsorgung von Abfällen aus Verbrennungsanlagen für Siedlungsabfälle – Baden Württemberg". Erich Schmidt Verlag, Berlin, 1994.
- [LAGA M20 1998] Mitteilung 20 der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA). "Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Abfällen – Technische Regeln". 4. erweiterte Auflage. Erich Schmidt Verlag, Berlin, 1998.
- [LAGA M20 2004] Mitteilung 20 der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA). "Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Abfällen – Technische Regeln". 5. erweiterte Auflage. 2004.
- [LAWA 2002] Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA). "Grundsätze des vorsorgenden Grundwasserschutzes bei Abfallverwertung und Produkteinsatz". Hannover, 2002. Heruntergeladen am 16.04.2007: <http://www.lawa.de/pub/kostenlos/gw/GAP-Papier06-02NEU.pdf>.
- [LFU BW 2004] Landesanstalt für Umweltschutz Baden- Württemberg. "Schlacken aus Hausmüllverbrennungsanlagen in Baden Württemberg". Karlsruhe, 2004. Heruntergeladen am 13.05.2007: http://www.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/11076/schlacken_aus_hausmuellverbrennungsanlagen.pdf?command=downloadContent&filename=schlacken_aus_hausmuellverbrennungsanlagen.pdf.
- [LICHTENSTEIGER 1994] Lichtensteiger, T.; Zeltner, C.: "Wie lassen sich Feststoffqualitäten beurteilen". In Baccini, P. et al.: "Deponierung fester Rückstände aus der Abfallwirtschaft – Endlagerqualität am Beispiel Müllschlacke". Tagungsunterlagen, vdf Hochschulverlag AG, ETH Zürich, S. 11-34.
- [LÜCK 2004] Lück, T.: "Die weitergehende Aufbereitung von Müllverbrennungsschlacke nach dem Verfahren der Scherer + Kohl GmbH". In: Thomé- Kozmiensky, K.J.: "Optimierung der Abfallverbrennung 1",.: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, Neuruppin, 2004.

- [MARTIN 2007] Martin GmbH. Firmeninformationen zum SYNCOM Verfahren aus Internetseite der Fa. Martin GmbH. Heruntergeladen am 12.08.2007, http://www.martingmbh.de/index.php?level=2&CatID=6.27&inhalt_id=23.
- [MARTIN 2007a] Martin GmbH. Broschüre zur Thermischen Abfallbehandlungsanlage MHKW Mainz, Februar 2007. Heruntergeladen am 12.08.2007: http://www.martingmbh.de/download_pdf.php?pfad=pdf%2Fbroschueren%2FMainz_03_07.pdf.
- [MARTIN 2007b] Martin GmbH. Broschüre zum Entschlacker, Februar 2007. Heruntergeladen am 12.08.2007: http://www.martingmbh.de/download_pdf.php?pfad=pdf%2Fbroschueren%2FEntschlacker_03_07.pdf.
- [M HMVA 2005] Merkblatt über die Verwendung von Hausmüllverbrennungsasche im Straßenbau – M HMVA" (FGSV- Nr. 638), FGSV-Verlag, 2005.
- [MOSER 2006] Moser, Chr. et al.: "Bestimmung von Bindungsformen des Kohlenstoffs –TOC, TIC und TEC – in Rostaschen von Müllverbrennungsanlagen". Müll und Abfall 38 (2006) Heft 11. S. 568 – 574.
- [NN 2008] NN: "Ökotoxikologische Charakterisierung von Abfällen". Umwelt (2008) Heft 5. S. 245-246. (Zeitschrift des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit).
- [PFRANG-STOTZ 1996] Pfrang-Stotz, G. et al. "Elutionsverhalten und bautechnische Eignung von Müllverbrennungsschlacken unter besonderer Berücksichtigung mineralog. Einflüsse". VDI-Seminar Schlackeaufbereitung, -verwertung und –entsorgung, Bamberg, 13./14. 6 1996.
- [PFRANG-STOTZ 2005] Pfrang Stotz, G., Reichelt, J.: "Einfluss geänderter Stoffströme in der Abfallwirtschaft auf die zukünftige Qualität und die Verwertungsmöglichkeiten von Müllverbrennungsschlacken". FZKA-Bericht 7025, Forschungszentrum Karlsruhe. Januar 2005.
- [PRETZ 1999] Pretz, Th.: "Aufbereitung von Müllverbrennungsschlacken unter besonderer Berücksichtigung der Metallrückgewinnung", Publikation vom Lehrstuhl für Aufbereitung und Recycling fester Abfälle der RWTH Aachen. Heruntergeladen am 16.07.2007: http://www.iar.rwth-aachen.de/www/upload/Publikationen/download/bis1999/v06_sfb525.pdf.
- [REIMANN 1988] Reimann, D.O.: "Schwermetalle und anorganische Schadstoffe im Hausmüll mit ihrer Verteilung auf die feste und gasförmige Phase", VGB Kraftwerkstechnik 68 (1988) Heft 8. S. 837-841.
- [REIMANN 1992] Reimann, D.O., Hämmerli-Wirth, H.: "Verbrennungstechniken – Bedarf-Entwicklung-Berechnung-Optimierung". Abfallwirtschaftsjournal 4 (1992) Heft 8. S. 605-679.

- [REIMANN 1996] Reimann, D.O.: "Schlackemenge und –inhaltsstoffe aus der therm. Restabfallbehandlung".VDI-Seminar Schlackeaufbereitung, -verwertung und –entsorgung, Bamberg, 13./14. 6 1996.
- [RENDEK 2007] Rendek, E., Ducom, G. Germain, P.: " Influence of waste input and combustion technology on MSWI bottom ash quality". Waste 27 (2007) Issue 10, S. 1403-1407.
- [RÖMKE 2007] Römke, J.; Moser, H.: "Ökotoxikologische Charakterisierung von Aschen aus Müllverbrennungsanlagen". VGB PowerTech 87 (2007) Heft 12, S. 62-68.
- [STEFFENS-T. 1993] Steffens-Tun, W.: "MVA- Schlacken verglasen".Umwelt 23 (1993) Heft 3. S. 125-129.
- [TA SI 1991] Dritte Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Abfallgesetz. Technische Anleitung zur Verwertung, Behandlung und sonstigen Entsorgung von Siedlungsabfällen. TA Siedlungsabfall. 14. Mai 1993.
- [TL GESTEIN-STB 04] Technische Lieferbedingung für Gesteinskörnungen im Straßenbau – TL Gestein-StB 04. (FGSV- Nr. 613), FGSV-Verlag, 2004.
- [TL G SOB-STB 04] Technischen Lieferbedingungen für Baustoffgemische und Böden zur Herstellung von Schichten ohne Bindemittel im Straßenbau, Teil: Güteüberwachung, Ausgabe 2004 – TL G SoB-StB 04. (FGSV-Nr. 696), FGSV-Verlag, 2004.
- [TL SOB-STB 04] Technischen Lieferbedingungen für Baustoffgemische und Böden zur Herstellung von Schichten ohne Bindemittel im Straßenbau, Ausgabe 2004 – TL SoB-StB 04. (FGSV-Nr. 697), FGSV-Verlag, 2004.
- [VDI 3460 2002] VDI-Richtlinie 3460. "Emissionsminderung - Thermische Abfallbehandlung". Beuth-Verlag Berlin, 2002.
- [VDI 3460-2 2007] VDI-Richtlinie 3460 Blatt 2 "Emissionsminderung - Energieumwandlung bei der thermischen Abfallbehandlung". Beuth-Verlag Berlin, 2007.
- [VERBÜCHELN 2003] Verbücheln, M. et al.: "Strategie für die Zukunft der Siedlungsabfallentsorgung – Kurzfassung". Heruntergeladen am 12.06.2007: http://www.cleaner-production.de/fileadmin/assets/pdfs/_85_Kurzfassung_Ziel2020.pdf.
- [WALK 2007] Walk, W. Persönliche Information. August 2007.
- [WHG 2002] Gesetz zur Ordnung des Wasserhaushalts WHG – Wasserhaushaltsgesetz. Fassung vom 19. August 2002.
- [WIESE 1998] Wiese, Chr. et al.: "Einfluss der Abfallzusammensetzung auf die Qualität der Schlacke bei der Verbrennung von Rest-Siedlungsabfällen". Müll und Abfall 30 (1998) Heft 11. S. 685-693.

- [WIMMER 2001] Wimmer, M.: "MVA-Schlacke – ein anthropogenes Sediment", Dissertation, Bayerischen Julius-Maximilians-Universität Würzburg, 2001.
- [WEIGAND 2005] Weigand, H. & Marb, C.: "Zusammensetzung und Schadstoffgehalt von Restmüll aus Haushaltungen – Teil 2: Restmüllzusammensetzung als Funktion von Siedlungsstruktur und Abfallwirtschaftssystem". Müll und Abfall 37 (2005) Heft 10. S. 522-529.
- [ZÜHLSDORF] Zühlsdorf, A.: "Die neue Deponieverwertungsverordnung". Baustoff Recycling Deponietechnik 21 (2005) Heft 5. S. 30-34.
- [ZTV SOB-STB 04] Zusätzlichen Technischen Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Schichten ohne Bindemittel im Straßenbau, Ausgabe 2004 – ZTV SoB-StB 04. (FGSV-Nr. 698), FGSV-Verlag, 2004.
- [ZWAHR 2005] Zwahr, H.: "MV-Schlacke- mehr als nur ein ungeliebter Baustoff?". Müll und Abfall 37 (2005) Heft 3. S. 114-122.
- [ZWAHR 2006] Zwahr, H.: "Eigenschaften mineralischer Abfälle, Stand der Aufbereitungstechnik und Untersuchungsverfahren von MVA-Schlacken". Hanseatische Schlackenkontor GmbH, Hamburg. Heruntergeladen am 22.05.2007:
http://www.bmu.de/files/abfallwirtschaft/downloads/application/pdf/abfw_workshop_zwahr.pdf.

11 Abkürzungsverzeichnis

AbfAbIV	Abfallablagerungsverordnung
AbwV	Abwasserverordnung
AVV	Abfallverzeichnisverordnung
BREF	Best Available Technique Referenz Documents
BBodSchG	Bundesbodenschutzgesetz
BBodSchV	Bundesbodenschutz- und Altlastenverordnung
BImSchG	Bundesimmissionsschutzgesetz
BImSchV	Bundesimmissionsschutzverordnung
DepV	Deponieverordnung
DepVerwV	Deponieverwertungsverordnung
DEV S4	Deutsches Einheitsverfahren S4
DK	Deponieklasse
DOC	Dissolved Organic Carbon
EOX	Extrahierbare organisch gebundene Halogenverbindungen (abgekürzt als X), eine Bezeichnung für adsorbierbare organisch gebundene Halogene in Feststoffproben
FGSV	Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswegebau
FStrG	Bundesfernstraßengesetz
F&E	Forschung und Entwicklung
GAP- Papier	Grundsätze des vorsorgenden Grundwasserschutzes bei Abfallverwertung und Produkteinsatz
GrundwV	Grundwasserverordnung
HMV-Schlacke	Hausmüllverbrennungsschlacke
ITAD	Interessengemeinschaft der thermischen Abfallbehandlungsanlagen in Deutschland e.V.
k.A.	keine Angaben
KrW-/AbfG	Kreislaufwirtschafts-/ Abfallgesetz
LAGA	Länderarbeitsgemeinschaft Abfall
LAWA	Länderarbeitsgemeinschaft Wasser
L/S- Verhältnis	Liquide/Solide- Verhältnis (Flüssigkeit/Feststoff-Verhältnis)
MBA	Mechanisch biologische Abfallbehandlung
MVA	Müllverbrennungsanlage
MV-Schlacke	Müllverbrennungsschlacke
NE- Metalle	Nichteisenmetalle
Öko- Institut e.V.	Institut für angewandte Ökologie e.V.
PCDD	Polychlorierte Dibenzodioxine
PCDF	Polychlorierte Dibenzofurane
SNCR	Selective Non Catalytic Reduction
TA Siedlungsabfall	Technische Anleitung zur Verwertung, Behandlung und sonstigen Entsorgung von Siedlungsabfällen
TIC	Total Inorganic Carbon
TOC	Total Organic Carbon
UMK	Umweltministerkonferenz
VGB	Vereinigung der Großkraftwerksbetreiber e.V.
WHG	Wasserhaushaltsgesetz

Anhang

Fragebogen

Fragebogen zur Datensammlung für eine Diplomarbeit zum Thema: Entsorgung von Schlacke aus der Abfallverbrennung

Verbrennungsanlage: _____

Daten zum Brennstoff- / Anlageninput

1. Wie setzt sich der Brennstoff zusammen?

- | | |
|--|-----|
| Hausmüll (Restmüll): | █ % |
| Sperrmüll: | █ % |
| Gewerbeabfall: | █ % |
| DSD- Sortierreste: | █ % |
| Heizwertreiche Fraktion aus MBA bzw. sonstiger mech. Aufbereitung: | █ % |
| Sonstiges: _____: | █ % |
| _____: | █ % |

2. Findet eine Homogenisierung / mech. Vorbehandlung
 des Abfalls statt?

ja nein

Wenn ja, wie? _____

3. Welchen durchschnittlichen Heizwert hat der Abfall?

█ MJ/kg

Daten zur Anlage

	Linie 1	Linie 2
Inbetriebnahme d. Kessels (Jahr):	█	█
Abfalldurchsatz [t/h]:	█	█
Feuerraumgeometrie:		
Gleichstrom	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Mittelstrom	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Gegenstrom	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Feuerraumvolumen [m ³]: (bis erste sekundäre Luftzuführung)	█	█

	Linie 1	Linie 2																
Rostsystem: <u>Bauart:</u> Hersteller: <input type="text"/> Vorschubrost <input type="checkbox"/> Rückschubrost <input type="checkbox"/> Walzenrost <input type="checkbox"/> Sonstige Bauart: <input type="text"/> Anzahl der Primärluftzonen: <input type="text"/> <u>Kühlung:</u> Wassergekühlt? <input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein Wenn ja, welche Zonen? <input type="text"/> <u>Geometrische Maße:</u> Länge [m]: <input type="text"/> Breite [m]: <input type="text"/> Mittlere Brennstoff- Verweilzeit auf dem Rost [min]: <input type="text"/>	<input type="text"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="text"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/>	<input type="text"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="text"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/>																
Luftvorwärmung: Wenn ja, mit welcher Temperatur [°C]? <input type="text"/>	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein <input type="text"/>	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein <input type="text"/>																
Abgasrückführung: Wenn ja, wie viel [m ³ /h]? <input type="text"/> Wenn ja, wohin wird diese geführt?	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein <input type="text"/> <input type="checkbox"/> Primärluft <input type="checkbox"/> Sekundärluft <input type="checkbox"/> Seitenwandluft	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein <input type="text"/> <input type="checkbox"/> Primärluft <input type="checkbox"/> Sekundärluft <input type="checkbox"/> Seitenwandluft																
Luftverteilung: [% oder m³/h] Primärluftzuführung: Seitenwandluftzuführung: Sekundärluftzuführung:	<table border="1"> <thead> <tr> <th>%</th> <th>m³/h</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td><input type="text"/></td> <td><input type="text"/></td> </tr> <tr> <td><input type="text"/></td> <td><input type="text"/></td> </tr> <tr> <td><input type="text"/></td> <td><input type="text"/></td> </tr> </tbody> </table>	%	m ³ /h	<input type="text"/>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>%</th> <th>m³/h</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td><input type="text"/></td> <td><input type="text"/></td> </tr> <tr> <td><input type="text"/></td> <td><input type="text"/></td> </tr> <tr> <td><input type="text"/></td> <td><input type="text"/></td> </tr> </tbody> </table>	%	m ³ /h	<input type="text"/>										
%	m ³ /h																	
<input type="text"/>	<input type="text"/>																	
<input type="text"/>	<input type="text"/>																	
<input type="text"/>	<input type="text"/>																	
%	m ³ /h																	
<input type="text"/>	<input type="text"/>																	
<input type="text"/>	<input type="text"/>																	
<input type="text"/>	<input type="text"/>																	
Sauerstoffgehalt nach Kessel [Vol.-%, feuchtes RG]:	<input type="text"/>	<input type="text"/>																

Daten zur Schlacke

4. Wie groß ist die anfallende Schlackemenge? t/h

5. Welche chemische Zusammensetzung und Eluatwerte ergaben Analysen der anfallenden Schlacke?

(Alternativ zu den unten aufgeführten Tabellen wäre ich dankbar für zusätzliche Datenblätter über einzelne Analysenergebnisse, die eine detaillierte Einschätzung der Streubreite bzw. zeitliche Veränderungen ermöglichen.)

Chemische Zusammensetzung (Analysezeitraum: von bis):

Bestandteile	Masse- %			
	Anzahl der Messwerte	Min.	Max.	Mittel
SiO ₂				
CaO				
Al ₂ O ₃				
Fe ₂ O ₃				
MgO				
Na ₂ O				
P ₂ O ₅				
K ₂ O				
TiO ₂				
SO ₄				
As				
Pb				
Cd				
Cr, ges.				
Cu				
Ni				
Zn				
Cl				
Ba				
Sb				
TOC				
Glühverlust				
PCDD/F [ng TEQ/kg]				
PAK (EPA) [µg/kg]				
PCB [µg/kg]				

Eluatwerte (Analysezeitraum von bis):

Parameter	Einheit	Parameter	Einheit
pH-Wert		Antimon	µg/l
el. Leitfähigkeit	µS/cm	Arsen	µg/l
Ammonium-N	mg/l	Blei	µg/l
Chlorid	mg/l	Cadmium	µg/l
Sulfat	mg/l	Chrom ges.	µg/l
Cyanid ges	µg/l	Kupfer	µg/l
Fluorid	mg/l	Nickel	µg/l
DOC	mg/l	Quecksilber	µg/l
AOX	mg/l	Vanadium	µg/l
Phenol-Index	µg/l	Zink	µg/l

6. Die angegebenen Werte sind Eluatwerte für: Rohschlacke
 abgelagerte Rohschlacke
(Lagerdauer:)
7. Nach welcher Methode wurden die Eluatwerte bestimmt? DIN EN 12457 Teil
 DIN 38414 Teil 4 (DEV S4)
8. Was passiert mit dem Rostdurchfall? Rückführung in Feuerraum
 Zuführung in Schlacke
9. Parameter zum Entschlacker / Schlackebad:
Temperatur des Waschwassers: °C
pH - Wert des Waschwassers:
10. Findet eine zusätzliche Schlackewäsche statt? ja nein
Wenn ja: Wie wird das Waschwasser behandelt? _____
Verbleib des Waschwassers: _____
11. Erfolgt eine mechanische Aufbereitung am Standort? ja nein
Wenn ja, wie? _____
12. Findet eine Lagerung der Schlacke am Standort statt? ja nein
Wenn ja, unter welchen Bedingungen? Art: _____
Dauer: Tage
13. Wer führt die Aufbereitung der Schlacke durch? _____
14. Wie hoch sind die Entsorgungskosten der Schlacke? €/t

Zusatzfragen

Zur Flugaschenentsorgung:

15. Wieviel Flugasche fällt bei der Anlage an? kg/h
16. Wie wird die Flugasche entsorgt? _____
17. Wie hoch sind die Kosten der Flugaschenentsorgung? €/t
18. Besteht aus Betreibersicht Interesse an Behandlungsverfahren für die Flugasche, die eine gemeinsame Entsorgung der Flugasche mit der Schlacke ermöglichen?
 ja nein
19. Falls ja, was darf eine derartige Behandlung maximal kosten? €/t