

Erzeugung von Ersatzrohstoffen für die Zementindustrie durch Nassaufbereitung von MVA-Schlacken

Gerhard Stockinger

1.	Ausgangslage.....	145
2.	Zement.....	146
3.	Theoretische Mengen- und Substitutionspotenziale von MVA-Schlacken	148
4.	Qualitätsanforderungen an Ersatzrohstoffe für die Zementindustrie	150
5.	Aufbereitungsprozess und Qualität aufbereiteter Schlacken	151
6.	Mengenpotenzial und Qualität der aufbereiteten Schlacken	152
7.	Zusammenfassung	157
8.	Literatur.....	157

1. Ausgangslage

Die Firma Brantner betreibt in Österreich seit 2013 eine Anlage zur Nassaufbereitung von Abfallverbrennungsschlacken (MVA-Schlacken) nach dem Brantner Wet Slag (BWS) Verfahren.

Das Verfahren sortiert Metalle aus MVA-Schlacken im Kornbereich von etwa 2-50 mm. Ein nasses Dichtentrennverfahren mit integrierter Wäsche und FE-, NE-Abscheidung wird für diesen Prozess verwendet. Ab Sommer 2017 wird zusätzlich eine Feinschlackenaufbereitung (FSTP) im Kornbereich von 0,05-2 mm in Betrieb genommen.

Der Restmetallgehalt der entmetallisierten Schlacke ist sehr gering. Die aufbereiteten MVA-Schlacken sind für eine Ablagerung auf Reststoffdeponien geeignet.

Die erzeugten Metallkonzentrate werden an Metallhütten und Metallaufbereitungsanlagen vermarktet. Die Metallausbeute ist um etwa zwanzig bis dreißig Prozent höher als bei konventionellen Systemen.

Im Zuge der Verfahrensentwicklung wurden Möglichkeiten zur stofflichen Verwertung der aufbereiteten Schlacken untersucht. Anwendungen als gebundene und ungebundene Tragschichten, Beton- oder Asphaltzuschlagstoffe und Ersatzrohstoffe in der Zementindustrie wurden betrachtet.

Im Zuge einer Masterarbeit an der Montanuniversität Leoben, werden derzeit die Kriterien für den Einsatz von aufbereiteten MVA-Schlacken in österreichischen Zementwerken bearbeitet.

2. Zement

Zement ist ein Massenbaustoff mit einem eingeschränkten wirtschaftlichen Transportradius. Die Produktion von Zement benötigt große Mengen an günstigen, gut verfügbaren Rohstoffen. Deswegen wurden die Herstellprozesse von Zement an eine breite Palette von natürlichen Mineralien und industriell erzeugten Rohstoffen angepasst. [12]

Die Produktion von Zement benötigt mineralische Ausgangsmaterialien mit den Hauptbestandteilen von Zement. Die Hauptbestandteile von Zement sind Kalziumoxid (CaO), Siliziumoxid (SiO₂), in geringeren Mengen Aluminiumoxid (Al₂O₃) und Eisenoxid (Fe₂O₃). [15]

Die vier Hauptbestandteile von Zement stellen über neunzig Prozent der Erdkruste dar und sind weltweit vorhanden. Durch die allgemeine Verbreitung der Hauptbestandteile sind diese auch in vielen Restprodukten aus industriellen Prozessen und auch MVA-Schlacken zu finden. [14]

Zementwerke werden meist in der Nähe von mineralischen Rohstoffvorkommen und den dazugehörigen Abnehmermärkten errichtet.

Energieträger für die Herstellung von Zement können auch über größere Distanzen transportiert werden.

In Österreich wurden 2015 etwa 4,6 Millionen Tonnen [10] und in Europa etwa 248 Millionen Tonnen Zement erzeugt. Die weltweite Zementproduktion betrug 2015 etwa 4,6 Milliarden Tonnen, wobei die größten Mengen in Asien produziert wurden. [4]

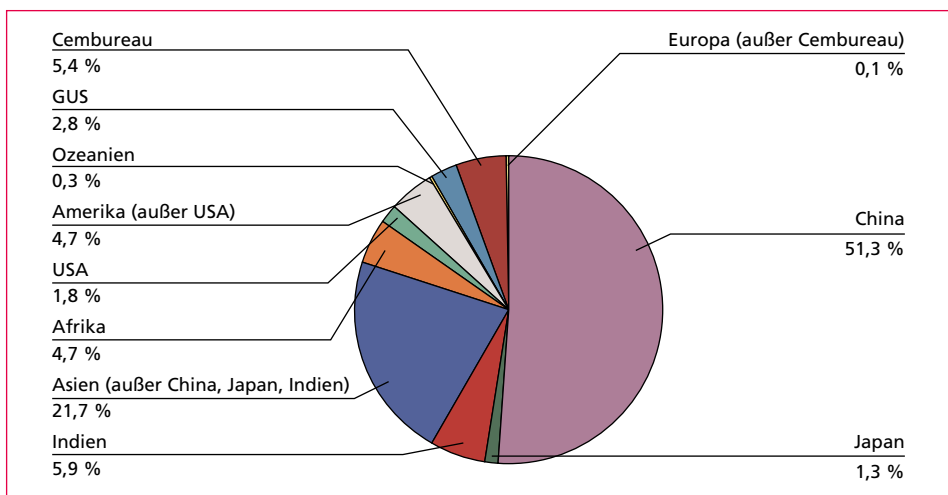


Bild 1: Weltweite Zement-Produktion 2015

Quelle: CEMBUREAU: Activity Report 2015. Brüssel, 2017

Rohstoffbedarf Zement

Die Produktion von Zement erfolgt aus den oben genannten Hauptbestandteilen die zu Klinker gebrannt werden. Das Verhältnis Rohmehl zu Klinker wird mit dem Rohmehlfaktor beschrieben. Für die Produktion von Zement wird Klinker mit Zumahlstoffen vermahlen. Das Verhältnis Klinker zu produziertem Zement wird im Klinkerfaktor ausgewiesen.

Der Klinker- und Rohmehlfaktor variiert je nach Zementart und Herstellprozess sehr stark. In Österreich betrug der Rohmehlfaktor 2015 durchschnittlich $1,546 \frac{t_{\text{Rm}}}{t_{\text{Kl}}}$ (Tonne Rohmehl pro Tonne Klinker). Für eine Tonne Klinker mussten 1,546 Tonnen Rohmehl dem Produktionsprozess zugeführt werden. [10]

Der Klinkerfaktor wird im selben Jahr mit $0,702 \frac{t_{\text{Kl}}}{t_{\text{Ze}}}$ angegeben. Für die Produktion von einer Tonne Zement wurde im Durchschnitt 0,702 Tonnen Klinker verarbeitet. [10]

Aus den Produktionszahlen und dem Rohmehl- und Klinkerfaktor wurde der durchschnittliche Rohstoffbedarf für die Erzeugung von Zement in Tabelle 1 abgeschätzt. Der Rohstoffbedarf ist deutlich höher als die produzierten Zementmengen.

Tabelle 1: Abschätzung des Rohstoffbedarfs für die Zementherstellung*

Abschätzung Rohstoffbedarf zur Zementherstellung		Klinkerfaktor %	Zementherst. Mio. t/a	Klinkerherst. Mio. t/a	Rohmehlfaktor	Rohstoffbedarf Mio. t/a
Österreich	Mittelwert	70	4,61	3,23	1,55	4,99
Europa	Mittelwert	70	248	173,60	1,60	277,76
Weltweit	Mittelwert	70	4.600	3.220	1,60	5.152,00

Quelle: Stockinger, G.: Alternative Ersatzrohstoffe für die Zementherstellung aus aufbereiteten Rückständen der Müllverbrennung (MVA Aschen und Schlacken). Leoben, 2017

* Für die Abschätzung wurden die Angaben von Mausitz [10] und CEMBUREAU [4] verwendet. Die Klinker- und Rohmehlfaktoren wurden entsprechend den vorhandenen Angaben verwendet oder angenommen.

Aus produktionstechnischen und wirtschaftlichen Gründen werden natürliche Primärrohstoffe entsprechend den Anforderungen durch Ersatzrohstoffe oder Zumahlstoffen ersetzt.

Der Einsatz von Ersatzrohstoffen und Zumahlstoffen ist in Europa unterschiedlich geregelt. Zumahlstoffen sind in der EN 197-1 aufgelistet. Zumahlstoffen für die Herstellung von genormten Zementen sind z.B. Hüttensand, Steinkohle Flugasche, Trass oder Kalkstein.

Schlacken aus Abfallverbrennungsanlagen sind nicht in der Norm enthalten. Eine Herstellung von normgerechtem Zement mit Zumahlstoffen aus Abfallverbrennungsschlacken ist daher nicht möglich.

Sekundäre Rohstoffe oder Ersatzrohstoffe werden seit Jahren für die Klinkerherstellung eingesetzt. Diese sind z.B. Ziegelbruch, Gießereisande, Walzzunder, diverse Aschen und Schlacken. [10]

Schlacken aus Abfallverbrennungsanlagen wurden versuchsweise in Deutschland verwendet. [14] Aktuell werden MVA-Schlacken als Ersatzrohstoffe in Italien eingesetzt. [6] Über den Einsatz von MVA-Schlacken in anderen Ländern sind derzeit keine Informationen vorhanden.

In Österreich wurden 2015 keine MVA-Schlacken als Ersatzrohstoffe ausgewiesen. Jedoch wurden Ersatzrohstoffe im Umfang von 0,61 Millionen Tonnen verarbeitet. Die verarbeitete Menge entspricht etwa 12 Prozent der eingesetzten Rohstoffe. [10]

Die Einsatzmenge von sekundären Rohstoffen hängt von der Verfügbarkeit und den technischen, rechtlichen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen ab.

Auch die Schonung von Primärlagerstätten oder der Einsatz von Ersatzrohstoffen als Korrekturmateriale von primären Rohstoffen, kann ein Anreiz für den Einsatz von Ersatzrohstoffen sein.

3. Theoretische Mengen- und Substitutionspotenziale von MVA-Schlacken

Abfallverbrennungsschlacken (MVA-Schlacken) sind ein großer mineralischer Mengenstrom, der bisher nur eine untergeordnete Rolle als Ersatzrohstoff darstellt.

Unter dem Begriff MVA-Schlacken werden Aschen und Schlacken von unterschiedlichen Verbrennungstechnologien, Anfallstellen und Schlackenaustragungssystemen zusammengefasst.

Die Bezeichnungen der Aschen und Schlacken variieren je nach System und Betreiber und werden häufig wie folgt unterteilt:

- Röstöfen,
 - * Rostasche,
 - nass ausgetragen,
 - trocken ausgetragen,
 - * diverse Flugaschen,
- Drehrohröfen,
- Wirbelschichtöfen,
 - * diverse Bettaschen,
 - * diverse Flugaschen.

Im konkreten Fall wurde nur die nass ausgetragene Rostasche von Abfallverbrennungsanlagen mit Röstöfen betrachtet.

Rostfeuerungsanlagen mit nassem Schlackenauswurf werden weltweit am häufigsten verwendet.

MVA-Schlacken sind ein großer inhomogener Abfallstrom. Die Qualität kann sich durch Schwankungen in der Abfallzusammensetzung oder anderen Einflüssen ändern. In MVA-Schlacken können sehr große und massive Störstoffe wie z.B. Stahlteile, Schrauben, Bolzen oder Kugeln enthalten sein. Fein dispergierte Metalle aus den MVA-Schlacken könnten den Chemismus des Zements beeinträchtigen und müssen daher unter den Grenzwerten für die Zementherstellung gehalten werden. [12]

Durch das Verbrennen von salzhaltigen Abfällen wie z.B. PVC-Abfälle oder salzhaltige Lebensmittelreste, gelangen Salze in die Schlacke. Diese können sich negativ auf die Zementqualität und den Zementherstellungsprozess auswirken. Die Schadstoffbelastung durch Metalle und Salze kann erheblich sein. Unbehandelte Schlacke ist für den Einsatz als Ersatzrohstoff in der Regel nicht geeignet. [12]

Mengen MVA-Schlacken

Die publizierten Schlackenmengen und Schlackenqualitäten variieren sehr stark. Die unterschiedlichen Bezeichnungen von MVA-Schlacken, die Probenahmen und Analysenverfahren sind dafür verantwortlich. Bei fehlenden Angaben über die Schlackenmengen von einzelnen Ländern oder Regionen können die Mengen anhand von verbrannten Abfallmengen und einem Schlackenfaktor von zwanzig bis dreißig Prozent Schlacke pro verbrannter Tonne Abfall abgeschätzt werden. [8]

In Österreich wurden 2015 592.700 Tonnen MVA-Schlacken mit der Bezeichnung *Schlacken und Aschen aus Abfallverbrennungsanlagen* pro Jahr deponiert. [1] Diese Menge beinhaltet Schlacken und Aschen aus Rost-, Drehrohr- und Wirbelschichtöfen. Flugaschen aus der Abgasreinigung sind nicht enthalten.

Für Europa gibt es Angaben und errechnete Mengen von etwa 13,4 bis 26,4 Millionen t/a. Häufig wird die Schlackenmenge in Europa mit 18 Millionen t/a angegeben. [8]

Der Anteil an thermischer Abfallentsorgung in Abfallverbrennungsanlagen schwankt in den einzelnen europäischen Ländern sehr stark. Vor allem in Mittel und Nordeuropa ist der Anteil an Abfallverbrennungsanlagen für die Entsorgung von nicht recycelten Abfällen hoch. In einigen Ländern von Europa wird nach wie vor der überwiegende Teil der Abfälle deponiert. In diesen Ländern fallen auch keine MVA-Schlacken an.

Über die weltweiten produzierten Mengen an MVA-Schlacken gibt es Abschätzungen und Näherungsrechnungen von 21 bis 29 Millionen t/a. [3, 5, 8]

Diese Mengen können ebenfalls sehr ungleichmäßig in den einzelnen Ländern und Regionen verteilt sein.

Tabelle 2: Theoretisches Substitutionspotenzial durch MVA Schlacke*

Abschätzung theoretisches Substitutionspotenzial						MVA-Schlacke		theoretisches Substitutionspotenzial Rohstoffe	
	Klinkerfaktor	Zementherst.	Klinkerherst.	Rohmehlfaktor	Rohstoffbedarf	min.	max.	min.	max.
	%	Mio. t/a	Mio. t/a		Mio. t/a	Mio. t/a	Mio. t/a	%	%
Österreich	70	4,61	3,23	1,55	4,99	0,59		11,83	
Europa	70	248	173,60	1,60	277,76	13,40	26,40	4,82	9,50
Weltweit	70	4.600	3.220	1,60	5.152	21	29	0,41	0,56

Quelle: Stockinger, G.: Alternative Ersatzrohstoffe für die Zementerzeugung aus aufbereiteten Rückständen der Müllverbrennung (MVA Aschen und Schlacken). Leoben, 2017

* Für die Abschätzung wurden die Angaben von Mausitz [10] und CEMBUREAU [4] verwendet. Die Klinker- und Rohmehlfaktoren wurden entsprechend den vorhandenen Angaben verwendet oder angenommen. Die Angaben über MVA Schlacken Mengen stammen aus verfügbaren Daten oder Hochrechnungen von Rohdaten und schwanken je nach Quelle sehr stark. [1, 3, 5, 8]

Betrachtet man in Tabelle 1 den Rohstoffbedarf für die mit den regional verfügbaren Mengen an MVA-Schlacken in Tabelle 2, unterscheiden sich die möglichen, maximalen Substitutionspotenziale von primären Rohstoffen in der Zementherstellung beträchtlich.

Durch die hohe Anzahl an Abfallverbrennungsanlagen in Österreich und in einigen Ländern Mittel- und Nordeuropas, ist der regionale Anfall an MVA-Schlacken in Europa deutlich höher als in Asien oder einigen osteuropäischen Ländern. Die theoretischen Substitutionspotenziale variieren bei näherer Betrachtung von einzelnen Zementwerken noch beträchtlicher. Zementwerke in unmittelbarer Nähe von großen Ballungsräumen und einem Abfallwirtschaftssystem mit Abfallverbrennungsanlagen, können deutlich höhere Substitutionspotenziale erwarten. Im Gegenzug ist der Einsatz von MVA-Schlacken von weit entfernten Abfallverbrennungsanlagen, aufgrund der hohen Transportkosten wirtschaftlich nicht möglich.

Zementwerke werden in der Nähe von Rohstofflagerstätten oder Abnehmermärkten errichtet. Die Standorte von Abfallverbrennungsanlagen werden nach strategischen, politischen oder energetischen Argumenten gewählt. Die Standorte von Zementwerken und MVA-Anlagen müssen nicht immer in der gleichen Region sein. Schlackenaufbereitungsanlagen sind oft nicht direkt an MVA's angeschlossen. Bei vielen konventionellen Schlackenaufbereitungsanlagen müssen die MVA-Schlacken vor einer Verarbeitung gelagert (karbonatisiert) werden um eine bessere Behandlung zu ermöglichen. Aus diesem Grund ist die Aufbereitung von MVA-Schlacken oft auf externe Aufbereitungsstandorte oder Deponiestandorte ausgelagert. Die Anbindung dieser Standorte an hochrangigen Straßen-, Eisenbahnverbindungen oder Schifffahrtswegen ist nicht immer gegeben.

4. Qualitätsanforderungen an Ersatzrohstoffe für die Zementindustrie

Ersatzrohstoffe sollten im Idealfall alle benötigten mineralischen Bestandteile in der richtigen Verteilung aufweisen und keine schädlichen Bestandteile enthalten.

In der Cement Sustainability Initiative (CSI) werden Ersatzrohstoffe folgendermaßen definiert:

Ausgewählte Abfälle und Nebenprodukte, die brauchbare Mineralien wie Kalzium, Aluminium oder Eisen enthalten, können in Klinkeröfen zum Einsatz kommen und natürliche Rohstoffe wie Kalkstein, Ton, Mergel, Kreide und andere ersetzen. [11, 17]

Der Einsatz von Ersatzrohstoffen ist von rechtlichen, technischen, und wirtschaftlichen Kriterien abhängig.

Damit Ersatzrohstoffe verwendet werden können, muss der daraus erzeugte Zement den geltenden Qualitätskriterien entsprechen und einen gesamtheitlichen Vorteil gegenüber Primärrohstoffen erbringen. Die Zementwerke müssen für die Verarbeitung von Abfällen geeignet und genehmigt sein.

Einige Ersatzrohstoffe werden seit Jahren erfolgreich in der Zementherstellung eingesetzt. Die daraus gewonnenen Erfahrungen können beim Einsatz von neuen Ersatzrohstoffen berücksichtigt werden.

Eine Handlungsempfehlung des Forschungsinstituts der Zementindustrie (FIZ) gibt einen guten Überblick über den Prozess zur Einführung von neuen Ersatzrohstoffen.

Ergänzend zur Abfallverbrennungsverordnung (AVV) BGBI II Nr. 389/2002 idgF und der Handlungsempfehlung erstellte das Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (BMLFUW) die *Technische Grundlagen für den Einsatz von Abfällen als Ersatzrohstoffe in Anlagen zur Zementerzeugung*.

Diese technische Grundlage und die Handlungsempfehlung sind eine Grundlage zur Abschätzung der Eignung von MVA-Schlacken für den Einsatz in Zementwerken.

In der technischen Grundlage ist ergänzend zur Abfallverbrennungsverordnung (AVV) die Erstuntersuchung von Ersatzrohstoffen auf organischen und anorganischen Schadstoffen beschrieben. Weiters sind Grenzwerte für anorganische Schadstoffe und die Verpflichtung zu Stoffstromanalysen für den Zement- und Abgaspfad enthalten. Die Werte der Stoffstromanalyse sollten die Vorsorgewerte im Zement nicht überschreiten.

Die technische Grundlage ist mit einer Revisionsklausel zur Anpassung der Grenzwerte und des Analyseprozedere versehen.

5. Aufbereitungsprozess und Qualität aufbereiteter Schlacken

Die betrachteten MVA-Schlacken werden in einem geschlossenen Nassprozess produziert. Die Schlacken werden gewaschen und mit einem Dichtesortiersystem in schwere Metalle und einer Schlacken- und Leichtmetallfraktion abgetrennt. Aluminium und verbleibende schwere Metalle, werden mit einem NE-Abscheider aus der gewaschenen Schlackenfraktion abgetrennt. Kunststoffe und sonstige schwimmfähige Materialien werden als Schwimmfraktion im Prozess entfernt.

Die Feinfraktionen $< 0,1$ mm und < 2 mm könnten zur Schadstoffanreicherung getrennt aus dem Prozess gefahren werden.

Am Ende des Prozesses wird derzeit eine entmetallisierte Schlackenfraktion in der Korngröße etwa < 50 mm für die Deponierung auf Reststoffdeponien produziert.

Im Kornbereich von < 2 mm wird durch fehlende technische und wirtschaftliche Rahmenbedingungen die Metallabscheidung nur ansatzweise durchgeführt. In diesem Kornbereich ist nach der Aufbereitung noch Metall enthalten. Im Sommer 2017 wird eine Feinschlackenaufbereitungsanlage für den Kornbereich 0,05-2 mm in Betrieb genommen. In Labor- und Technikumsversuchen wurde eine weitgehende Entfernung von Metallen in diesem Kornspektrum nachgewiesen. Feines Aluminium wird in der aktuellen Ausbaustufe nicht abgetrennt. Durch die Entschlammung und Abwaschung des Haftkorns von der Schlacke ist die Abtrennwirkung von Metallen durch NE-Abscheider wesentlich verbessert. Ein Feinkorn-NE-Abscheider könnte bei Bedarf nachgerüstet werden.

Der Aufbereitungsprozess besteht wie in Bild 2 ersichtlich aus fünf Hauptaggregaten und hat eine Verarbeitungskapazität von etwa 40 t/h.

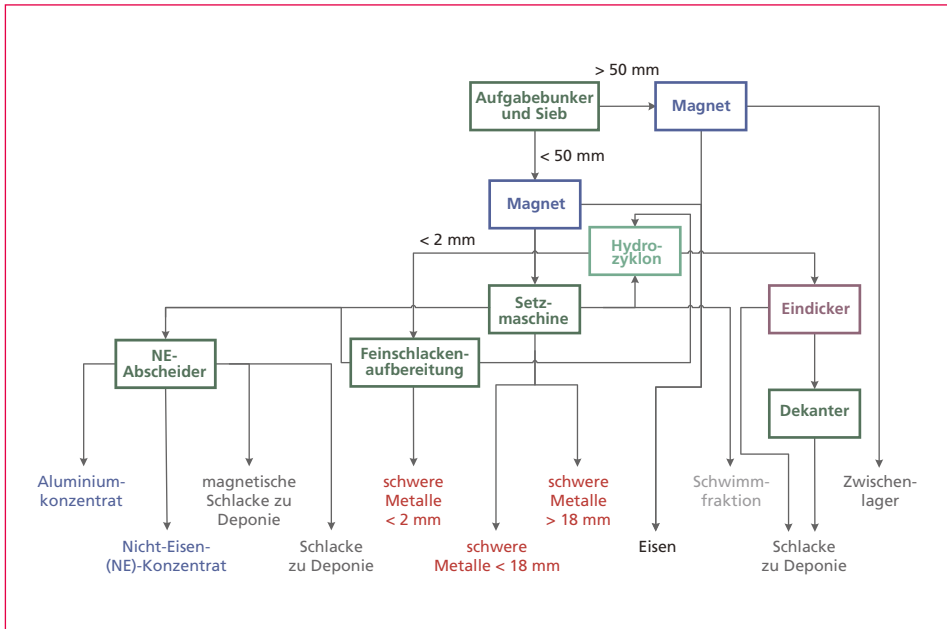


Bild 2: Anlagenschema der Schlackenaufbereitung

Quelle: Stockinger, G.: Alternative Ersatzrohstoffe für die Zementerzeugung aus aufbereiteten Rückständen der Müllverbrennung (MVA-Aschen und Schlacken). Leoben, 2017

Durch den einfachen und universellen Aufbau ist das System für frische und abgelagerte Rostschlacken und Bettaschen mit oder ohne Alterung geeignet. Ein Vorbrechen der Schlacke ist nicht nötig, erhöht jedoch die Ausbeute durch Freilegen von in der Schlacke eingeschmolzenen Metallen.

Die kompakte und modulare Bauweise verringert den Platzbedarf, das Investitionsvolumen und die Betriebskosten.

Im Vergleich zu konventionellen Schlackenaufbereitungssystemen ist die Menge an zurückgewonnenen Metallen um etwa 20 bis 30 % höher. Ab Sommer 2017 können auch Feinmetalle im Kornbereich von 0,05-2 mm produziert werden.

Die gewonnenen Metallkonzentrate werden direkt in Metallhütten verarbeitet oder einem weiteren Aufbereitungsprozess unterzogen.

6. Mengenpotenzial und Qualität der aufbereiteten Schlacken

Die betrachtete Nassaufbereitung von MVA-Schlacken wird seit 2013 betrieben. Die Rückgewinnung von vermarktungsfähigen Metallen ist das Hauptziel der Anlage. Die aufbereiteten MVA-Schlacken werden in der eigenen Reststoffdeponie abgelagert.

Die Erzeugung von Ersatzrohstoffen ist nicht primäres Ziel des Prozesses und deshalb wurden die Analysen der entmetallisierten Schlacken entsprechend der Deponieverordnung

für Abfälle auf Reststoffdeponien durchgeführt. Die Analysen und Analysennormen sind nicht in allen Bereichen ident mit den Normen der *Technischen Grundlagen für den Einsatz von Abfällen als Ersatzrohstoff in Anlagen zur Zementerzeugung*.

Der überwiegende Teil der Analysen von aufbereiteten MVA-Schlacken wurde vor der Ausarbeitung der technischen Grundlagen erarbeitet. Die Analysen können daher nur als Abschätzung für eine Eignung von aufbereiteten MVA-Schlacken für den Einsatz als Ersatzrohstoff verwendet werden. Für den konkreten Ersteinsatz müssten die Untersuchungen entsprechend wiederholt werden.

Die technischen Grundlagen sehen eine Erstuntersuchung gemäß dem Stand der Technik vor. Als Beispiel wird die ÖNORM S 2127 *Grundlegende Charakterisierung von Abfallhaufen oder von festen Abfällen aus Behältnissen und Transportfahrzeugen*, vom 01.11.11 genannt. [12]

In der Erstuntersuchung werden anorganische Parameter und organische Parameter untersucht.

Im organischen Teil wird neben dem TOC, ein Schwerpunkt auf flüchtige organische Verbindungen (VOC) gelegt. [12]

Bei Verdacht auf Vorhandensein von organischen Verbindungen und Bestandteilen, müssen die Parameter BTEX, LCKW, PAK, POP, PCB und Dioxine/Furane in die Erstuntersuchung aufgenommen werden. [12]

Für den Einsatz von MVA-Schlacken als Ersatzrohstoffe sollten alle oben genannten Parameter untersucht werden.

Einige Parameter wie PCB und PCDD/PCDF wurden bisher nur in unbehandelten MVA-Schlacken oder nicht bei den eigenen MVA-Schlacken analysiert. Unter der Annahme, dass bei der mechanischen Aufbereitung keine PCB und PCDD/PCDF entstehen, wurden diese Parameter zur Abschätzung herangezogen. [12]

Neben den Untersuchungen des Ersatzrohstoffes ist eine Stoffstromanalyse durchzuführen. Im System Zementerzeugung ist der Transfer von Schadstoffen in den Luft- und Zementpfad zu betrachten. [12]

Im Punkt 3 (11) der technischen Grundlagen sind die Grenzwerte für die Parameter Sb, As, Pb, Cd, Cr, Co, Ni, Hg und Tl aufgelistet. Die Grenzwerte sind unter Berücksichtigung der Revisionsklausel, Punkt 3(12), ab 01.07.2018 gültig. [2]

Nachfolgend werden die vorhandenen anorganischen Analyseergebnisse mit den Grenzwerten der technischen Grundlagen verglichen und eine Abschätzung der Eignung von aufbereiteten MVA-Schlacken und den potenziellen Mengen durchgeführt.

Anorganische Parameter Schlackenfraktionen

Im verwendeten Aufbereitungsverfahren wird eine Schlackenfraktion 0-50 mm produziert. Diese Fraktion kann in eine Feinfraktion < 0,1 mm (etwa 5 bis 10 % der Menge) und eine 0,1-50 mm Fraktion aufgetrennt werden. In der Tabelle 3 wurden diese beiden

Fractionen getrennt analysiert. Die Werte der Schlackenfraktion 0-50 mm wurden rechnerisch ermittelt. Eine Fraktion 2-50 mm konnte zum Zeitpunkt der Erstellung des Berichts noch nicht analysiert werden und wird nicht näher betrachtet. Diese Fraktion sollte geringere anorganische Konzentrationen enthalten. [12]

Zur leichteren Orientierung sind in der Tabelle 3 die Grenzwertüberschreitungen rot und Grenzwertunterschreitungen grün hinterlegt. Zur Abschätzung der Verteilung wurden der arithmetische Mittelwert, Median-, min.- und max.-Wert sowie die Anzahl der verfügbaren Analysen angegeben. [12]

Das Auftreten von Ausreißern ist in jede Richtung ersichtlich. Die Ausreißer sind auf die Inhomogenität der Schlacke und auf die Probleme bei der Probenahme und Probenaufbereitung zurückzuführen. Diese sind bei roher und aufbereiteter MVA-Schlacke durch stückige Metallteile erheblich. [12]

Der Grenzwert für Antimon wird in allen Betrachtungen deutlich überschritten. Antimon wird durch die Schlackenaufbereitung um den Faktor 3 – 4 gegenüber unbehandelten MVA-Schlacken reduziert. Dieser Effekt lässt auf einen Austrag von Antimon als Legierungsmetall in den stückigen Metallen schließen. Mit der geplanten Feinschlackenaufbereitung könnte die Entfrachtung von Antimon noch verbessert werden.

Bei Blei ist kein eindeutiger Abreicherungsseffekt in den aufbereiteten MVA-Schlacken zu beobachten, obwohl stückiges metallisches Blei durch die Dichtentrennung sehr gut abgetrennt wird. Es ist keine eindeutige An- oder Abreicherung in den einzelnen Kornfraktionen ersichtlich.

Tabelle 3: Analyse anorganischer Schadstoffe in aufbereiteter MVA Schlacke

		Sb	As	Pb	Cd	Cr	Co	Ni	Hg	Tl
		mg/kg TS								
Grenzwerte		30	30	500	5	500	250	500	0,70	3
MVA Schlacke 0,1 – 50 mm	Mittelwert	56,9	7,8	531,2	4,5	355,4	40,6	181,1	0,08	1,43
	Median	59,9	5,4	546,9	4,2	293,5	29,0	150,8	0,06	1,46
	min.	35,5	0,6	370,0	2,5	171,0	22,0	103,0	0,04	0,38
	max.	72,3	19,7	661,0	7,4	814,2	82,3	320,0	0,04	2,49
	Anzahl	4	4	4	4	6	4	4	4	2
MVA Schlacke < 0,1 mm	Mittelwert	80,5	5,6	898,8	8,7	336,3	20,9	135,2	0,06	1,43
	Median	80,5	7,1	793,3	9,2	223,7	15,8	88,9	0,05	1,43
	min.	55,9	0,2	660,0	6,0	145,0	14,5	77,8	0,05	0,38
	max.	105,0	9,5	1.243	10,9	752,6	32,5	239,0	0,08	2,48
	Anzahl	2	3	3	3	4	3	3	3	2
MVA Schlacke 0 – 50 mm	Mittelwert	59,3	7,6	568,0	5,0	353,5	38,6	176,5	0,07	1,43
	Median	62,0	5,6	571,5	4,7	286,5	27,7	144,6	0,06	1,43
	min.	37,5	0,6	399,0	2,8	168,4	21,3	100,5	0,04	0,38
	max.	75,6	18,6	719,2	7,8	808,0	77,3	311,9	0,13	2,48

grün: Grenzwert unterschritten, rot: Grenzwert überschritten

Quelle: Stockinger, G.: Alternative Ersatzrohstoffe für die Zementherzeugung aus aufbereiteten Rückständen der Müllverbrennung (MVA Aschen und Schlacken). Leoben, 2017

Cadmium reichert sich in der Feinfraktion $< 0,1$ mm an. In den Fraktionen $> 0,1$ mm überschreitet eine Analyse den Grenzwert. Eine Unterschreitung der Grenzwerte ist durch Anpassungen im Aufbereitungs- und Analyseprozess denkbar.

Chrom überschreitet die Grenzwerte von 500 mg/kg TS bei zwei Messwerten deutlich, alle anderen Messwerte sind deutlich darunter. Ein systematischer Fehler ist bei diesen beiden Messwerten nicht auszuschließen und sollte weiter beobachtet werden.

Die restlichen Analysenwerte sind unter den Grenzwerten der technischen Grundlagen und unauffällig.

Aus der alleinigen Betrachtung der anorganischen Analysewerte, mit den Grenzwerten der technischen Grundlagen, ist der Einsatz von aufbereiteter MVA-Schlacken als Ersatzrohstoff nicht möglich.

Überschreitungen von Grenzwerten sind jedoch zulässig, sofern die Ergebnisse der Stoffstromanalyse keine Überschreitung der Vorsorge-Richtwerte für Zement laut Punkt 3 (21) der technischen Grundlagen ergeben. Die Einsatzmenge von Ersatzrohstoffen darf in diesem Fall maximal 10 Ma.-% der Rohmehlmenge betragen. [2]

Vorsorgerichtwert

In Tabelle 4 wurden von jedem Parameter der Vorsorgerichtwerte aus den technischen Grundlagen, mit dem höchsten Messwert und dem größten Transferkoeffizienten in den Zementpfad gerechnet. Die Anzahl der Analysen ist relativ gering und Ausreißer wirken sich erheblich aus.

Bei einer Substitution von sechs Prozent der primären Rohstoffe durch aufbereitete MVA-Schlacken, werden alle Vorsorgewerte unterschritten. Werden mehr als sechs Prozent MVA-Schlacken als Ersatzrohstoff eingesetzt, wird der Grenzwert von Arsen in der Fraktion 0,1 bis 50 mm und in der Fraktion 0-50 mm überschritten. Die Überschreitung wurde durch einen einzelnen Messwert hervorgerufen. Alle anderen Parameter unterschreiten die Vorsorgewerte auch beim Einsatz der maximal zulässigen Substitutionsrate von zehn Prozent durch MVA-Schlacken.

Wie in den technischen Grundlagen erwähnt, ist die Anzahl der Daten und die statistische Verteilung der Schadstoffgehalte in Ersatzrohstoffen noch unzureichend erfasst und gilt noch im Zuge der Revisionsklausel zu überprüfen. [2]

Eine Beurteilung der Schadstoffgehalte auf Basis der Einzelwerte, Median und des 80er Perzentils könnte das Problem mit Messwertausreißern verringern. [2]

Von den organischen Bestandteilen wurden TOC, BTEX und PAK untersucht. Für diese Werte sind in der technischen Richtlinie keine Grenzwerte angeführt. Die Daten müssen im Rahmen eines Projekts gesondert betrachtet werden.

Tabelle 4: Substitutionspotenziale und Vorsorgewerte *

Vergleich Substitutionspotenziale aufbereiteter MVA Schlacke mit Vorsorgewerten Zement		Errechnete Vorsorgewerte bei Analyse Messwerte Maximum von MVA Schlacken und max. Transferkoeffizient von anorganischen Parametern aus MVA Schlacken in Zement										
anorganische Parameter österr. Zement gerechnet (SB, TI VDZ Mittelwert)		Mittelwert		Antimon Sb	Arsen As	Blei Pb	Cadmium Cd	Kobalt Co	Chrom Cr	Quecksilber Hg	Nickel Ni	Thallium Tl
Vorsorgewert Zement (Technische Grundlagen)		max.		2,90	14,70	35,85	0,92	11,50	68,96	0,10	35,84	0,40
Analysewerte MVA Schlacke aufbereitet 0,1 – 50 mm	Substitutionspotenzial MVA Schlacken	max.	56,90	15,00	7,77	531,20	4,55	40,58	355,41	0,08	181,13	1,43
		Median	59,90		5,42	546,90	4,15	29,01	293,50	0,06	150,75	1,43
		min.	35,50		0,60	370,00	2,49	22,00	171,00	0,04	103,00	0,38
		max.	72,30		19,66	661,00	7,40	82,30	814,20	0,14	320,00	2,49
max. Substitutionspotenzial bei Einhaltung Vorsorgewert max. verfügbare Menge in Österreich nach Aufbereitung max. verfügbare Mengen in Europa nach Aufbereitung	6,00 %	max.	7,06		15,00	73,35	1,31	15,75	113,67	0,10	52,89	0,53
	9,22 %	max.	9,30		15,16	93,47	1,52	18,03	137,66	0,10	62,03	0,59
	7,69 %	max.	8,24		15,08	83,91	1,42	16,94	126,26	0,10	57,69	0,56
		max.	80,46		5,58	898,77	8,71	20,93	336,26	0,06	135,23	1,43
Analysewerte MVA Schlacke aufbereitet < 0,1 mm	Substitutionspotenzial MVA Schlacken	max.	80,46		7,12	793,30	9,20	15,80	223,70	0,05	88,90	1,43
		Median	80,46		0,16	660,00	6,02	14,50	145,00	0,05	77,80	0,38
		min.	55,90		9,46	1.243,00	10,90	32,50	752,62	0,08	239,00	2,48
		max.	105,01		9,03	1.082,6	1,52	12,76	109,98	0,10	48,03	0,52
max. Substitutionspotenzial bei Einhaltung Vorsorgewert max. verfügbare Menge in Österreich nach Aufbereitung max. verfügbare Mengen in Europa nach Aufbereitung	6,00 %	max.	9,03		14,39	147,11	1,84	13,44	131,99	0,10	54,57	0,59
	9,22 %	max.	12,31		14,22	147,11	1,84	13,44	131,99	0,10	54,57	0,59
	7,69 %	max.	10,75		14,30	128,65	1,69	13,11	121,53	0,10	51,46	0,56
		max.	59,26		7,55	567,96	4,96	38,61	353,49	0,07	176,54	1,43
Analysewerte MVA Schlacke aufbereitet 0 – 50 mm	Substitutionspotenzial MVA Schlacken	max.	61,96		5,59	571,54	4,66	27,68	286,52	0,06	144,57	1,43
		Median	37,54		0,56	399,00	2,84	21,25	168,40	0,04	100,48	0,38
		min.	75,57		18,64	719,20	7,75	77,32	808,04	0,13	311,90	2,48
		max.	7,26		14,94	76,84	1,33	15,45	113,30	0,10	52,40	0,53
max. Substitutionspotenzial bei Einhaltung Vorsorgewert max. verfügbare Menge in Österreich nach Aufbereitung max. verfügbare Mengen in Europa nach Aufbereitung	6,00 %	max.	9,60		15,06	98,83	1,55	17,57	137,10	0,10	61,29	0,59
	9,22 %	max.	8,49		15,00	88,38	1,44	16,56	125,79	0,10	57,06	0,56
	7,69 %	max.	8,49		15,00	88,38	1,44	16,56	125,79	0,10	57,06	0,56

Quelle: Stockinger, G.: Alternative Ersatzrohstoffe für die Zementherzeugung aus aufbereiteten Rückständen der Müllverbrennung (MVA Aschen und Schlacken). Leoben, 2017

* Anorganische Werte österr. Zement gerechnet [9]; Werte Sb, Ti: Mittelwert deutscher Zemente [16]; Vorsorgewerte Technische Grundlagen...[2]

7. Zusammenfassung

MVA-Schlacken sind ein großer Abfallstrom, der aufgrund seiner Zusammensetzung als Ersatzrohstoff in der Zementproduktion geeignet sein könnte. Durch den Anteil an Stör- und Schadstoffen ist eine Verarbeitung im Zementwerk ohne gründliche vorherige Aufbereitung nicht möglich. Große Metallteile können Aufbereitungs- und Förderaggregate im Zementwerk beschädigen. Kleine Metallteile werden mit konventioneller Technik nicht aus der Schlacke entfernt. Durch das kombinierte Dichtentrennverfahren mit Eisen- und Nichteisen-Abscheidern kann der Anteil von Metall > 2 mm drastisch reduziert werden. Eine geplante Feinschlackenaufbereitung im Kornbereich von 0,5-2 mm wird den Restmetallgehalt noch deutlich reduzieren.

Unter Einhaltung der anorganischen Grenzwerte der Technischen Grundlagen beträgt das Substitutionspotenzial von MVA-Schlacken als Ersatzrohstoff kleiner zehn Prozent. Einzelne Messwertausreißer, und daraus erfolgte Überschreitungen von Grenzwerten, sind auf die inhomogene Zusammensetzung von MVA-Schlacken zurück zu führen.

Eine Beurteilung der Analysenwerte, wie in der Abfallverbrennungsverordnung bei Ersatzbrennstoffen mit Absolut-, Median und 80er Perzentil umgesetzt, könnte die Problematik mit punktuellen Messwertüberschreitungen verringern.

Die organischen- und Chlorgehalte der MVA-Schlacken wurden nicht betrachtet und müssen in einem eigenen Projekt geprüft werden.

Der Einsatz von nass aufbereiteten MVA-Schlacken als Ersatzrohstoff in der Zementherstellung könnte im niedrigen Prozentbereich möglich sein, und einen weiteren Schritt zur Erreichung der europäischen Recyclingziele darstellen.

8. Literatur

- [1] BMLFUW: Bundesabfallwirtschaftsplan 2017. BMLFUW Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien, 2017
- [2] BMLFUW: Technische Grundlagen für den Einsatz von Ersatzrohstoffen in Anlagen zur Zementherzeugung. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien, 2016
- [3] Bunge, R.: Recovery of metals from waste incinerator bottom ash. UMTEC, Rapperswil, 2015
- [4] CEMBUREAU: Activity Report 2015. CEMBUREAU, Brüssel, 2017
- [5] ecopro: Weltweiter Markt für Müllverbrennungsanlagen. In: Umweltschutz 06/15. 2015, S. 18-19
- [6] Grosso, M.: MSWI Bottom Ash Management in Italy. Düsseldorf, 2016
- [7] Huber, H.; Jaros, M.; Lechner, P.: Emissionsverhalten von MVA-Schlacke nach künstlicher Alterung. Wien: ABF Boku, 1996
- [8] ITAD: Interessensgemeinschaft der Thermischen Abfallbehandlungsanlagen in Deutschland e.V. 10.01.2015; Online: https://www.itad.de/ITAD/reststoffe/360_reststoffe.png
- [9] Lederer, J. et al.: Wide-scale utilization of MSWI fly ashes in cement production and its impact on average heavy metal contents in cements: The case of Austria. Waste Management, 2016

- [10] Mauschitz, G.: Emissionen aus Anlagen der österreichischen Zementindustrie Berichtsjahr 2015. TU Wien, Wien, 2016
- [11] Schönberger, H.; Waltisberg, J.: Einfluss der Mitverbrennung von Abfällen in deutschen Zementwerken auf die Abgasemission. In: Energie aus Abfall, Band 11. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2014, S. 873-923
- [12] Stockinger, G.: Alternative Ersatzrohstoffe für die Zementerzeugung aus aufbereiteten Rückständen der Müllverbrennung (MVA-Aschen und Schlacken). Leoben, 2017
- [13] Stockinger, G.: eigene Darstellung, 2017
- [14] Thomé-Kozmiensky, K. J.: Aschen, Schlacken, Stäube aus Abfallverbrennung und Metallurgie. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2013
- [15] VDZ Verein Deutscher Zementwerke e.V.: Zement Taschenbuch 51. Auflage. Düsseldorf: Verlag Bau + Technik GmbH, 2008
- [16] VDZ Verein Deutscher Zementwerke e.V.: Tätigkeitsbericht 2003-2005. Düsseldorf, 2006
- [17] W. B. C. f. S. D. WBCSD: Guidelines for Co-Processing Fuels and Raw Materials in Cement. 17.01.2015; Online: http://www.wbcdcement.org/pdf/CSI%20Guidelines%20for%20Co-Processing%20Fuels%20and%20Raw%20Materials%20in%20Cement%20Manufacturing_v2.pdf