

MVA-Flugaschenrecycling in der Zementindustrie und deren Auswirkung auf Metallgehalte in Zementen

Jakob Lederer, Helmut Rechberger und Johann Fellner

1.	Einleitung.....	388
2.	Materialien und Methoden.....	389
2.1.	Ermittlung der Gesamtgehalte ausgewählter Schwermetalle im Zement bei derzeitigem Rohstoff- und Energiemix	389
2.1.1.	Ermittlung der durch Rohstoffe und Energieträger eingebrachten Schwermetalle in die Zementproduktion sowie deren Frachten im Abgas	390
2.1.2.	Ermittlung der Transferkoeffizienten ausgewählter Schwermetalle in der Klinkerproduktion	391
2.1.3.	Ermittlung der Gesamtgehalte und Konzentrationen ausgewählter Schwermetalle im Zement bei derzeitigem Rohstoff- und Energieträgermix	392
2.2.	Ermittlung der Gesamtgehalte ausgewählter Schwermetalle im Zement bei derzeitigem Rohstoff- und Energieträgermix und zusätzlicher Einbringung von Flugaschen aus österreichischen MVAs	392
3.	Ergebnisse	393
3.1.	Zementerzeugung in Österreich zwischen 2009 und 2012	393
3.1.1.	Massenflüsse	393
3.1.2.	Der durchschnittliche jährliche Umsatz von Schwermetallen in der Österreichischen Zementindustrie zwischen 2009 und 2012....	393
3.2.	Einfluss von Flugaschen aus österreichischen MVAs auf den Schwermetallgehalt von Zementen.....	396
4.	Diskussion und Schlussfolgerungen.....	399
5.	Literatur.....	399

Flugaschen aus Abfallverbrennungsanlagen (MVAs) werden in Europa zur Zeit nur in sehr geringen Maßen recycelt. Eine Möglichkeit des Recyclings von MVA-Flugaschen, welche vor allem in der wissenschaftlichen Literatur intensiv behandelt wurde und wird, ist deren Beigabe als Sekundärrohstoff in der Zementproduktion. Welche Auswirkungen diese Beigabe auf die Gehalte von bestimmten Schwermetallen im Zement hat, wird in diesem Beitrag am Beispiel Österreich untersucht. Zu diesem Zwecke wird eine Stoffflussanalyse exemplarisch für die Metalle Cd, Cr, und Hg durchgeführt.

Im ersten Schritt wird anhand von Literaturdaten die Konzentration dieser Metalle in durchschnittlichen österreichischen Zementen basierend auf dem derzeitigen Mix an Primär- und Sekundärrohstoffen, Primär- und Sekundärenergieträgern, sowie Primär- und Sekundärzumahlstoffen ermittelt. Im zweiten Schritt wird anhand spezifischer Daten zu den Flugaschen (Kessel- und Filteraschen) aus österreichischen MVAs mit Rostfeuerung ermittelt, wie sich deren Beigabe als Sekundärrohstoff in der österreichischen Zementproduktion auf die Metallgehalte in durchschnittlichen österreichischen Zementen auswirkt. Die Ergebnisse zeigen, dass MVA-Flugaschen nur geringe Steigerungen der Cr-Gehalte im Zement bewirken. Im Gegensatz dazu erhöhen sich die Konzentrationen von Hg (+105 Prozent) und Cd (+415 Prozent) um ein Vielfaches. Zwar zeigen verschiedenste Studien die relative Stabilität von Schwermetallen in der Betonmatrix, jedoch muss noch untersucht werden, ob eine Beimengung von MVA-Flugaschen zu späteren Betonabbruchmaterialien führt, die die Schwermetallgrenzwerte aktueller Recyclingbaustoffverordnungen einhalten können.

1. Einleitung

Flugaschen aus Abfallverbrennungsanlagen (MVAs) stellen eine besondere Form von Abfall dar. Aufgrund des Gesamt- und Eluatgehaltes an verschiedenen Stoffen, insbesondere Metalle und Salze, gelten sie als gefährlicher Abfall. Sofern eine gesonderte Prüfung nicht zu einer Ausstufung und somit der Möglichkeit der Deponierung auf einer Reststoffdeponie führt, müssen sie entweder in Deponien für gefährlichen Abfall untertage abgelagert oder vor Ablagerung auf einer Reststoffdeponie vorbehandelt werden. Die Stabilisierung mit Zement ist die dabei am häufigsten angewandte Form der Vorbehandlung. Sowohl Stabilisierung mit anschließender Ablagerung auf einer Reststoffdeponie, als auch Untertagedeponierung führen zu hohen Kosten und sind auch bezüglich langfristiger Umweltauswirkungen nicht unumstritten. Dadurch ergibt sich ein Anreiz, alternative Entsorgungs- oder Recyclingwege für Flugaschen aus der Abfallverbrennung zu finden.

Die im Vergleich zu anderen Abfällen relativ hohen Gehalte an Metallen, Salzen und mineralischen Bestandteilen wie CaO oder SiO₂ nähren die Hoffnung für eine Gewinnung von Sekundärrohstoffen aus MVA-Flugaschen. Während die Möglichkeit des Recyclings von Metallen (insbesondere Zink und Blei) und Salzen aus MVA-Flugaschen erst in letzter Zeit durch einzelne Studien Auftrieb erhielt [19, 26, 27, 34, 41], existieren im Gegensatz dazu schon zahlreiche Arbeiten zum Recycling von MVA-Flugaschen in der Bauwirtschaft, speziell als Sekundärrohstoff für die Zementerzeugung [2, 3, 16, 21, 22, 27, 28, 36, 38, 40, 42, 48]. Die wichtigsten Argumente darin für die Verwendung von MVA-Flugaschen als Sekundärrohstoff in der Zementerzeugung sind ihre mineralische Zusammensetzung, insbesondere die hohen Anteile von CaO, SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ [37]. Probleme bei der Verwendung von MVA-Flugaschen als Sekundärrohstoff bereiten einerseits die hohen Salzgehalte und andererseits bestimmte Schwermetalle.

Während Salzgehalte durch Flugaschenwaschung reduziert werden können, trifft dies auf Schwermetalle nur bedingt zu, nämlich für einzelne Metalle und unter stark sauren oder basischen Bedingungen in der Wäsche [3, 16, 21, 22, 36, 39, 40]. Neben dem Auswaschverhalten der durch diese Verfahren in den Beton eingebrachten Schwermetalle, das von verschiedenen Autoren entweder als wenig bedenklich [22, 42] oder zumindest langfristig als problematisch betrachtet wird [3, 48], stellt sich jedoch die generelle Frage, welche Menge an Schwermetallen durch die großflächige Verwendung von MVA-Flugaschen als Sekundärrohstoff für die Zementproduktion über den Zement in den Beton und somit die Bauwirtschaft gelangen.

Im vorliegenden Beitrag wird diese Fragestellung am Beispiel Einbringung von MVA-Flugaschen aus österreichischen MVAs als Sekundärrohstoff in die österreichische Zementindustrie behandelt.

2. Materialien und Methoden

MVA-Flugaschen enthalten fast alle durch den Menschen in Umlauf gebrachten anorganischen Stoffe und Verbindungen. Jedoch werden üblicherweise nur einige wenige aufgrund ihrer Menge sowie ihrer umweltrelevanten und die Betonqualität beeinflussenden Eigenschaften untersucht. Als eventuell problematisch aufgrund ihres Auslaugverhaltens einerseits und vorgeschriebener Grenzwerte im Zement andererseits sind Chromverbindungen (Cr) [3]. Stoffe mit einem besonderen Umwelverhalten sind etwa Quecksilber (Hg) und Cadmium (Cd) [20]. Die vorliegende Arbeit fokussiert sich daher auf diese drei Stoffe.

Die Forschungsfrage wird mittels Stoffflussanalyse (SFA) auf nationaler Ebene untersucht [10]. Beispiele für die Verwendung der SFA für ähnliche Forschungsfragen gibt es unter anderem für die Schweiz [18] und Österreich [20]. Zur Berechnung selbst wird die Software STAN verwendet [13, 14]

2.1. Ermittlung der Gesamtgehalte ausgewählter Schwermetalle im Zement bei derzeitigem Rohstoff- und Energiemix

Als Untersuchungsrahmen dient die österreichische Zementindustrie. Im ersten Schritt werden die Flüsse und Transferkoeffizienten für die betrachteten Schwermetalle beim derzeitigem Rohstoff- und Energiemix für die Zementerzeugung in Österreich ermittelt. Das Stoffflussmodell dafür lässt sich, wie in Bild 1 gezeigt, darstellen.

Die zwei wichtigsten Prozesse in der Zementherstellung sind, neben der in Bild 1 nicht dargestellten Rohstoffmühle und der Vorwärmung der Rohstoffe (Mahl-Trocknung) die Klinkerproduktion (P1) und die Zementmühle (P2). Die Hauptinputs in den Prozess Klinkerproduktion sind gemeinsam vermahlene Primärrohstoffe (F0), Sekundärrohstoffe (F1.1-F1.2), Primärbrennstoffe (F2.1-F2.5) sowie Sekundärbrennstoffe (F3.1-F3.8) und die wichtigsten Outputs aus diesem Prozess sind der produzierte Klinker (CL) und das Abgas (OG).

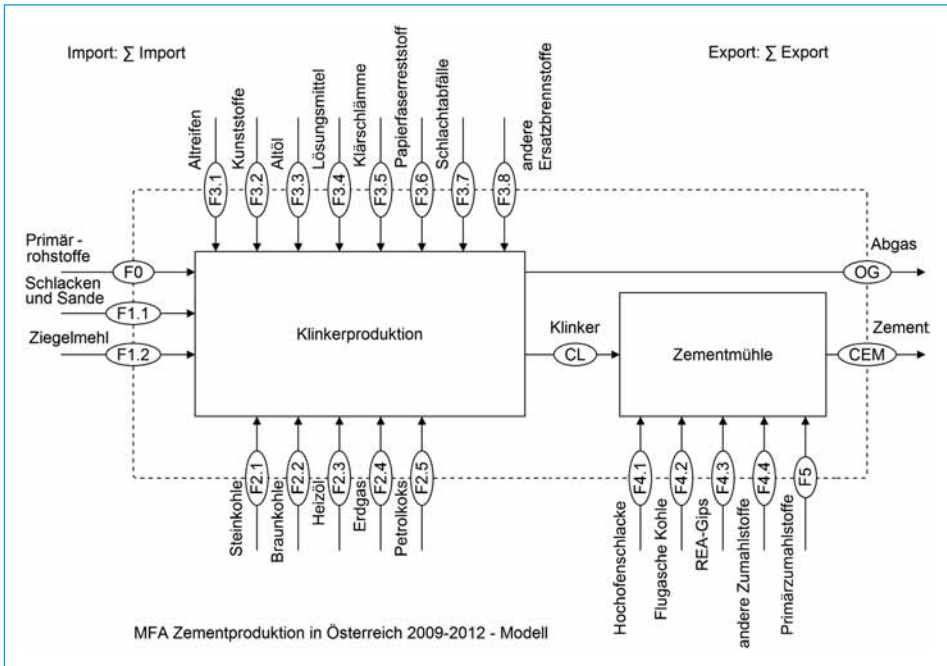


Bild 1: Berechnungsmodell zur Ermittlung der Massenflüsse in der österreichischen Zementindustrie (ohne Verbrennungsluft)

Im zweiten Prozess, der Zementmühle, werden verschiedene Sekundärzumahlstoffe (F4.1-F4.4) und Primärzumahlstoffe (F5) mit dem Klinker vermahlen. Der einzige berücksichtigte Output aus diesem Prozess ist das fertige Produkt, der Zement (CEM). Andere Outputs von für die Fragestellung geringerer Relevanz werden nicht berücksichtigt.

2.1.1. Ermittlung der durch Rohstoffe und Energieträger eingebrachten Schwermetalle in die Zementproduktion sowie deren Frachten im Abgas

Der Verbrauch an Primär- und Sekundärrohstoffen, konventionellen Energieträgern, Ersatzbrennstoffen und Sekundärzumahlstoffen einerseits, sowie produziertem Klinker und Zement andererseits, werden für die österreichische Zementindustrie in Mautschitz [31] angegeben. Anhand des Berechnungsmodells in Bild 1 kann dadurch die Menge an Abgas (Fluss OG) berechnet werden. Die für den Prozess notwendige Verbrennungsluft ist darin nicht berücksichtigt. Für die Berechnung des Eintrages der Schwermetalle Cd, Cr, und Hg in die Zementproduktion durch zurzeit verwendete Primär- und Sekundärrohstoffe, konventionelle Energieträger, Ersatzbrennstoffe und Sekundärzumahlstoffe werden Konzentrationen besagter Schwermetalle aus der Literatur verwendet. Einen Überblick über die Massenflüsse in der österreichischen Zementindustrie nach Mautschitz [31] sowie die Konzentrationen von Cd, Cr, und Hg in Primär- und Sekundärrohstoffen, konventionellen Energieträgern, Ersatzbrennstoffen und Sekundärzumahlstoffen zeigt Tabelle 1. Basierend auf diesen Werten kann der Eintrag an Cd, Cr, und Hg in den Zementherstellungsprozess ermittelt werden.

Tabelle 1: Menge an Zementausgangsstoffen basierend auf Mauschwitz (2013) und Konzentrationen von Cadmium, Chrom, und Quecksilber in diesen, basierend auf verschiedenen Literaturquellen. Die Menge an Primärzumahlstoffen wird über Prozessbilanzierung berechnet.

Fluss	Obergruppe	Menge		Cadmium		Chrom		Quecksilber		Literaturquellen für Konzentrationen
		kt/a		mg/kg		mg/kg		mg/kg		
		MW	SD	MW	SD	MW	SD	MW	SD	
Zement	Produkt	4.446	161							
Klinker	Zwischenprodukt	3.227	142							
Rohmehleinsatz	Primärrohstoff	4.547	299	0,15	0,05	39	16	0,05	0,04	[49]
Schlacken- und Gießereisande	Sekundärrohstoffe	60	7	0,50	0,45	32	8	0,20	0,18	[35, 8]
Ziegelmehl		423	92	1,00	0,50	76	20	0,10	0,05	[35, 8]
Steinkohle	Konventionelle Energieträger	58	26	0,10	0,03	15	5	0,16	0,03	[47]
Braunkohle		65	7	0,10	0,02	39	30	0,20	0,10	[47, 6]
Heizöl L, M, S		7	6	1,25	1,20	0,63	0,60	0,004	0,003	[24]
Erdgas		3	1	0	0	0	0	0	0	
Petrolkoks		25	10	1,25	1,20	0,63	0,60	0,004	0,003	[24]
Altreifen	Ersatzbrennstoffe (EBS)	31	5	7,50	2,50	54	43	0,001	0,001	[4, 9, 20]
Kunststoffabfälle		226	37	4,15	1,70	125	25	2,20	2,00	[17]
Altöl		11	3	3,00	2,50	80	70	0,20	0,15	[9, 32, 44]
Lösungsmittel		14	2	3,00	2,00	80	70	0,20	0,15	[9, 32, 44]
Klärschlämme		27	11	0,91	0,28	38	15	0,77	0,25	[30]
Papierfaserreststoff		39	5	2,00	1,80	20	10	0,30	0,20	[7, 9, 46]
Tiermehl		16	4	0,22	0,19	5	2	0,10	0,10	[12, 23, 24]
Sonstige EBS	41	9	2,97	1,57	57	34	0,54	0,41	[12, 20]	
Hochofenschlacke	Sekundärzumahlstoffe (SZS)	617	21	0,50	0,45	38	23	0,20	0,19	[15, 35]
Flugasche (Kohle)		125	14	0,50	0,25	150	80	0,10	0,05	[47, 49]
REA-Gips		48	1	0,15	0,14	27	17	0,25	0,20	[47, 49]
Sonstige SZS		98	18	0,38	0,28	71	40	0,18	0,15	[15, 35, 47, 49]
Primärzumahlstoffe	Primärzumahlstoff	*)	*)	0,15	0,05	39	16	0,05	0,04	[49]
MVA-Flugasche	Szenario	45	4	291	76	386	177	25	23	[5, 43]

MW: Mittelwert

SD: Standardabweichung

*) Berechnung über Prozessbilanzierung

Des Weiteren wurden nach Mauschwitz [31] in der österreichischen Zementindustrie in den Jahren 2009 bis 2012 durchschnittlich folgende Mengen an Schwermetallen über das Abgas emittiert: $5,6 \pm 1,6$ kg Cd/a; $19 \pm 5,7$ kg Cr/a; 120 ± 17 kg Hg/a.

2.1.2. Ermittlung der Transferkoeffizienten ausgewählter Schwermetalle in der Klinkerproduktion

Die in Punkt 2.1.1 ermittelten Inputs an Schwermetallen in die Klinkerproduktion teilen sich entsprechend Bild 1 auf die Outputs Abgas (OG) und Klinker (CL) auf.

Durch Bilanzierung dieses Prozesses anhand der bekannten Frachten an Schwermetallen in den Inputs (Tabelle 1) und Outputs (Abgas, Kapitel 2.1.1) können nicht nur deren resultierende Frachten und Konzentrationen im Klinker, sondern auch die Transferkoeffizienten für die betrachteten Schwermetalle in den Outputfluss Klinker (CL) im Prozess Klinkerproduktion ermittelt werden. Die Berechnung der Transferkoeffizienten erfolgt nach Brunner und Rechberger [10]:

$$TC_j = \dot{m}_{\text{output},j} / \sum_{i=1}^k \dot{m}_{\text{input},i} \quad (1)$$

wobei die Masse des jeweiligen Stoffes (Cd, Cr, Hg) im betrachteten Output-Fluss j und die Masse des jeweiligen Stoffes in der Summe aller Input-Flüsse i ist. Die Summe aller Transferkoeffizienten für einen Stoff im betrachteten Prozess muss, wie in Formel 2 dargestellt, eins ergeben.

$$\sum_{j=1}^l TC_j = 1 \quad (2)$$

Für den Prozess der Klinkerproduktion gibt es nur zwei relevante Outputflüsse, nämlich Abgas und Klinker, weswegen die Anzahl der Transferkoeffizienten gleich zwei ist. Die Transferkoeffizienten für Cd, Cr und Hg aus der Klinkerproduktion ins Abgas werden über die Summe der Inputs in den Prozess und der Outputs über das Abgas (Kapitel 2.1.1.) berechnet. Zieht man diese Transferkoeffizienten von der Summe aller Transferkoeffizienten wie in Formel 2 dargestellt ab, so erhält man die Transferkoeffizienten der Schwermetalle in den Outputfluss Klinker. Durch Multiplikation dieser mit den Inputs der Schwermetalle in die Klinkerproduktion lassen sich die Frachten der Schwermetalle im Klinker ermitteln. Anhand der Menge an produziertem Klinker nach Mausitz [31] (Tabelle 1) lassen sich die Konzentrationen der Schwermetalle im Klinker bestimmen.

2.1.3. Ermittlung der Gesamtgehalte und Konzentrationen ausgewählter Schwermetalle im Zement bei derzeitigem Rohstoff- und Energieträgermix

In den Prozess Zementmühle werden die Schwermetalle über den Klinker (Kapitel 2.1.2.) und die Sekundärzumahlstoffe (Kapitel 2.1.1.) eingebracht. Durch Addition beider kann die Fracht der Schwermetalle im Zement berechnet werden, und über die produzierte Zementmenge (Tabelle 1) auch deren Konzentrationen im Zement. Das Ergebnis der Berechnung wird mit Resultaten aus Zementanalysen aus Deutschland und Österreich verglichen.

2.2. Ermittlung der Gesamtgehalte ausgewählter Schwermetalle im Zement bei derzeitigem Rohstoff- und Energieträgermix und zusätzlicher Einbringung von Flugaschen aus österreichischen MVAs

Für die Menge der aus MVAs mit Rostfeuerung erzeugten Flugaschen (Kessel- und Filteraschen) werden die jeweils aktuellsten Betreiberangaben, meist aus dem Jahr 2013, verwendet. Die durchschnittlichen Konzentrationen an Cd, Cr, und Hg werden aus der Literatur entnommen [5, 43]. In Tabelle 1 (letzte Zeile) sind sowohl Mengen als auch Konzentrationen dargestellt. Daraus berechnet sich der Eintrag an

Schwermetallen durch MVA-Flugaschen in die Zementproduktion. Für die Berechnung wird angenommen, dass die MVA-Flugaschen als Sekundärrohstoff in die Klinkerproduktion eingebracht werden. Des Weiteren wird angenommen, dass die Transferkoeffizienten für Cd, Cr und Hg in der Klinkerproduktion konstant bleiben.

3. Ergebnisse

3.1. Zementerzeugung in Österreich zwischen 2009 und 2012

3.1.1. Massenflüsse

Bild 2 stellt die durchschnittlichen Massenflüsse in der österreichischen Zementproduktion zwischen 2009 und 2012 dar. Die Ergebnisse zeigen den hohen Einsatz von Ersatzbrennstoffen (66 Massenprozent aller Brennstoffe), Sekundärrohstoffen (etwa zehn Massenprozent aller Rohstoffe) sowie Primär- und Sekundärzumahlstoffen (dreißig Massenprozent aller Zumahlstoffe). Der Klinkeranteil im Zement beträgt damit etwa siebenzig Massenprozent.

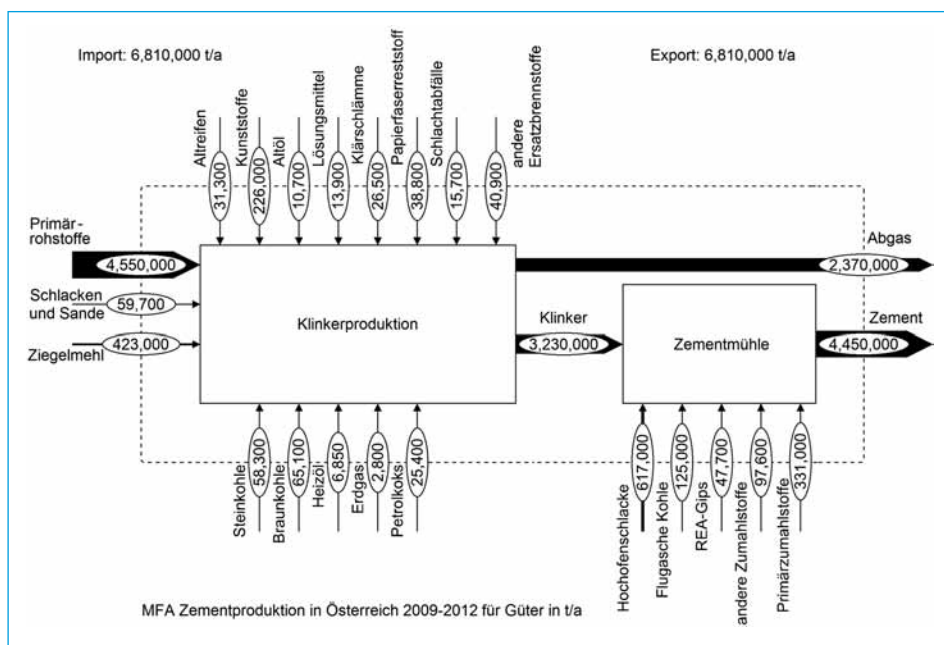


Bild 2: Durchschnittliche Massenflüsse für die Zementproduktion in Österreich zwischen 2009 und 2012 in t/a (ohne Verbrennungsluft)

3.1.2. Der durchschnittliche jährliche Umsatz von Schwermetallen in der Österreichischen Zementindustrie zwischen 2009 und 2012

Bild 3 zeigt den durchschnittlichen jährlichen Fluss von Cadmium in der österreichischen Zementindustrie zwischen 2009 und 2012. Cd wird hauptsächlich durch Kunststoffe als Ersatzbrennstoff (30 Prozent) sowie Primärrohstoffe (24 Prozent) eingetragen. Nennenswerte Beiträge stammen vom Ziegelmehl (14 Prozent) und der Hochfenschlacke (10 Prozent).

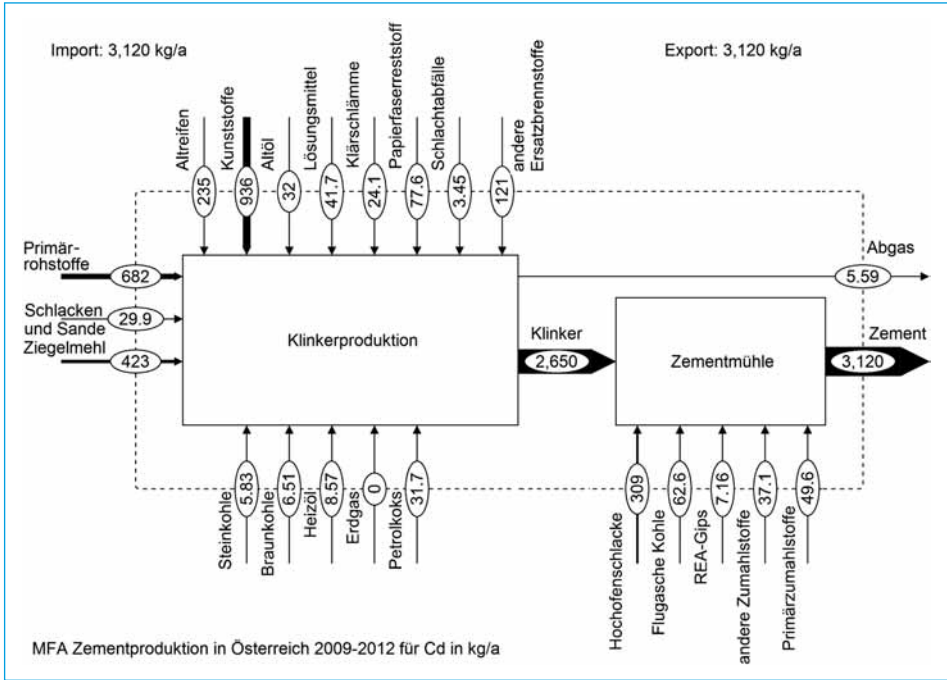


Bild 3: Durchschnittliche Massenflüsse für Cadmium in der Zementproduktion in Österreich zwischen 2009 und 2012 in kg/a

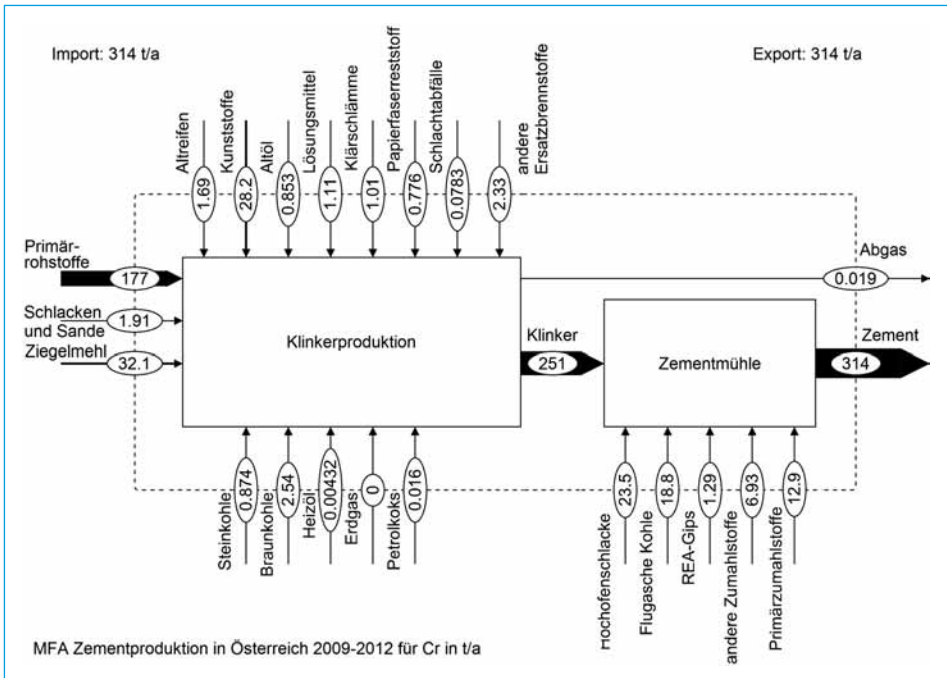


Bild 4: Durchschnittliche Massenflüsse für Chrom in der Zementproduktion in Österreich zwischen 2009 und 2012 in t/a

Im Gegensatz dazu wird Chrom hauptsächlich über Primärrohstoffe eingetragen (etwa sechzig Prozent). Erwähnenswert sind auch die Beiträge durch Zieglmehl, Hochofenschlacke, und Flugasche aus Kohlekraftwerken, mit jeweils etwa fünf bis zehn Prozent des Gesamtinputs. Ersatzbrennstoffe haben für den Eintrag von Chrom in den Zement keine nennenswerte Relevanz (Bild 4).

Bei Quecksilber wiederum sind Ersatzbrennstoffe aus Kunststofffraktionen mit 46 Prozent des Gesamtinputs der wichtigste Eintragungspfad in die Zementindustrie, gefolgt von Primärrohstoffen (22 Prozent) und Hochofenschlacke (12 Prozent). Der jeweilige Beitrag der übrigen Inputs beträgt weniger als fünf Prozent (Bild 5).

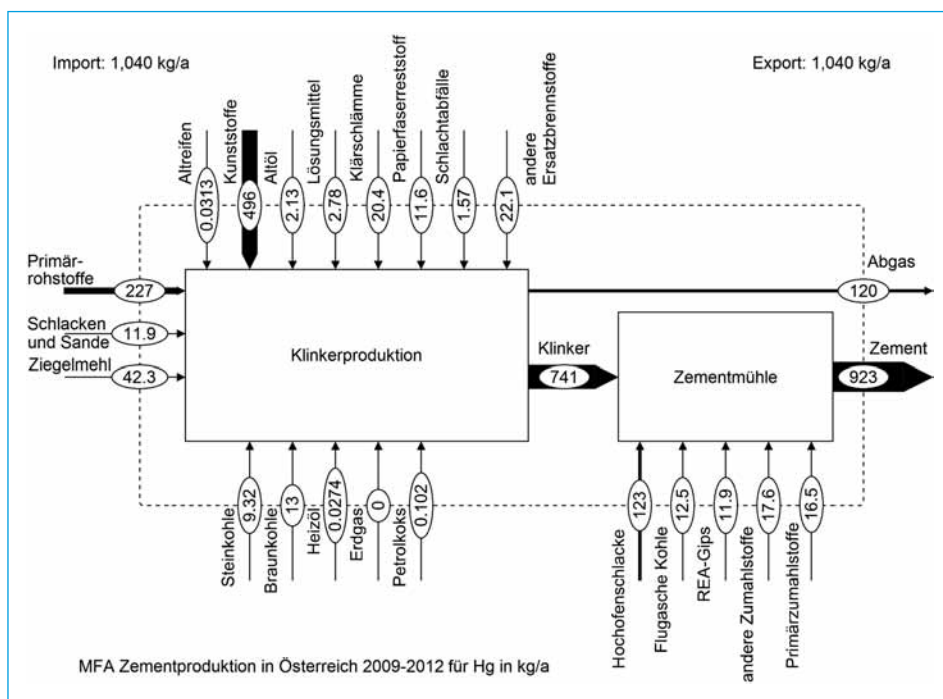


Bild 5: Durchschnittliche Massenflüsse für Quecksilber in der Zementproduktion in Österreich zwischen 2009 und 2012 in kg/a

Basierend auf diesen Zahlen lassen sich sowohl die Transferkoeffizienten der Schwermetalle im Klinkerproduktionsprozess, als auch die Gehalte der Schwermetalle im Zement ermitteln. Die Resultate dieser Berechnungen werden in Tabelle 2 dargestellt.

	Einheit	Cadmium	Chrom	Quecksilber
Transferkoeffizient Klinkerproduktion -> Klinker	-	0,998	0,99993	0,86
Transferkoeffizient Klinkerproduktion -> Abgas	-	0,002	0,00007	0,14
Berechnete Konzentrationen im Zement	mg/kg	0,70	71	0,21

Tabelle 2:

Transferkoeffizienten und Gehalte von Schwermetallen in der Zementproduktion

Die in Tabelle 2 dargestellten Werte für die Transferkoeffizienten bewegen sich für Chrom und Cadmium im Bereich der in der Literatur genannten Werte, zusammengefasst dargestellt von Zeschmar-Lahl [49]. Für Quecksilber ist der Transferkoeffizient in die Luft geringer als die meisten der in der Literatur genannten Werte, welche sich im Bereich 0,40-0,80 bewegen. Jedoch muss dabei erwähnt werden, dass die nach Mauschitz [31] zitierten Werte in dieser Studie nur die Emissionen von Hg über das Abgas des Drehrohrs enthalten. Gewisse Emissionen sind auch noch bei der Zementmühle zu erwarten, die jedoch hier nicht berücksichtigt wurden.

3.2. Einfluss von Flugaschen aus österreichischen MVAs auf den Schwermetallgehalt von Zementen

Durch die Verwendung von Flugaschen aus den österreichischen MVAs mit Rostfeuerung erhöht sich die produzierte Zementmenge nur geringfügig um ein Prozent. Die etwa 45.000 Tonnen an Flugasche fallen demnach um einiges weniger ins Gewicht wie Ziegelmehl, bewegen sich jedoch in der Größenordnung der Schlacken und Sande.

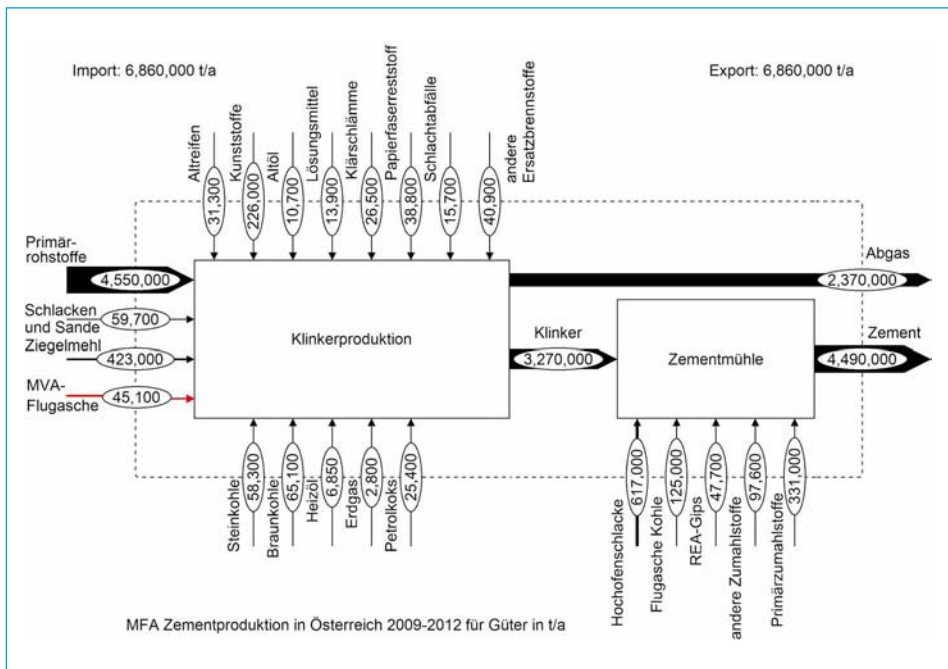


Bild 6: Durchschnittliche Massenflüsse in der Zementproduktion in Österreich nach Einbringung von MVA-Flugaschen in t/a

Auch der Einfluss der MVA-Flugaschen auf die Chromflüsse und -konzentrationen ist nur gering. Die Konzentrationen im Zement erhöhen sich dadurch nur um etwa vier Prozent im Vergleich zum Status quo (Bild 7).

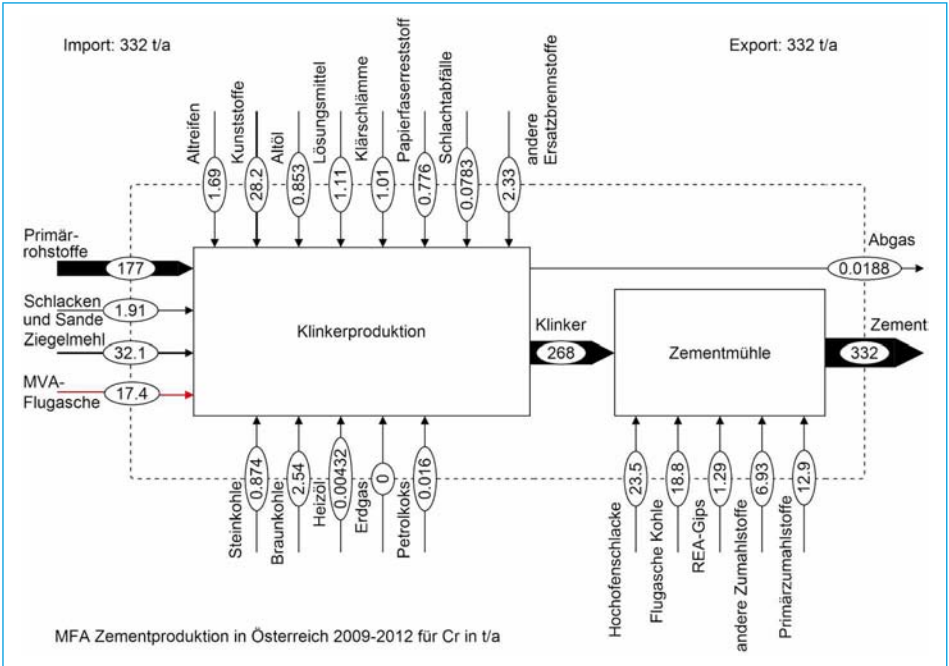


Bild 7: Durchschnittliche Massenflüsse für Chrom in der Zementproduktion in Österreich nach Einbringung von MVA-Flugaschen in t/a

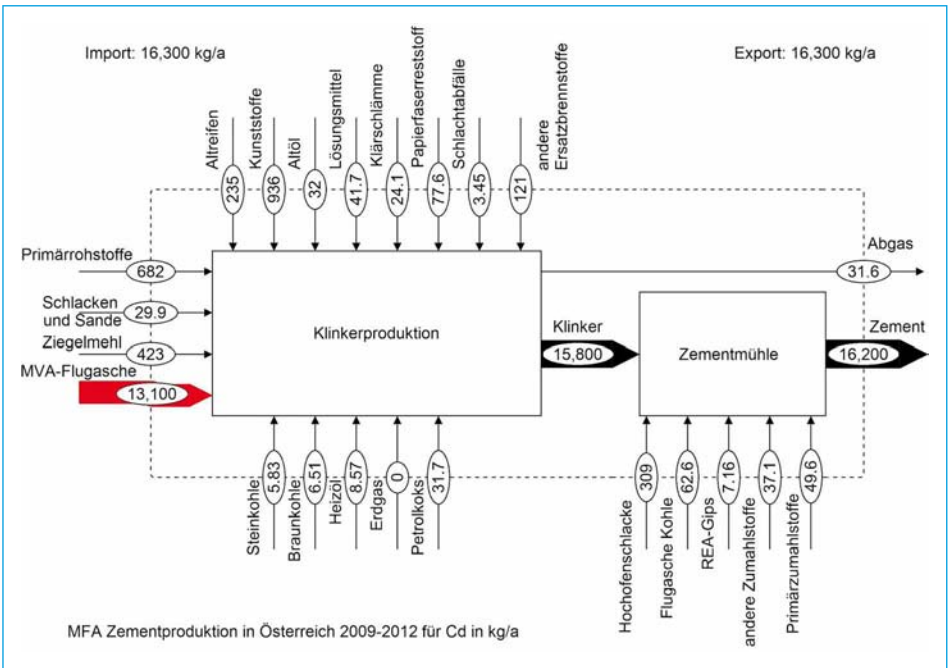


Bild 8: Durchschnittliche Massenflüsse für Cadmium in der Zementproduktion in Österreich nach Einbringung von MVA-Flugaschen in kg/a

Demgegenüber stehen jedoch beträchtliche Steigerungen des Umsatzes an Cadmium (Bild 8) und Quecksilber (Bild 9). Die folgenden Bilder 8 und 9 veranschaulichen diese Resultate. Für die Konzentrationen im Zement bedeutet dies eine Steigerung von 105 Prozent für Quecksilber und 415 Prozent für Cadmium.

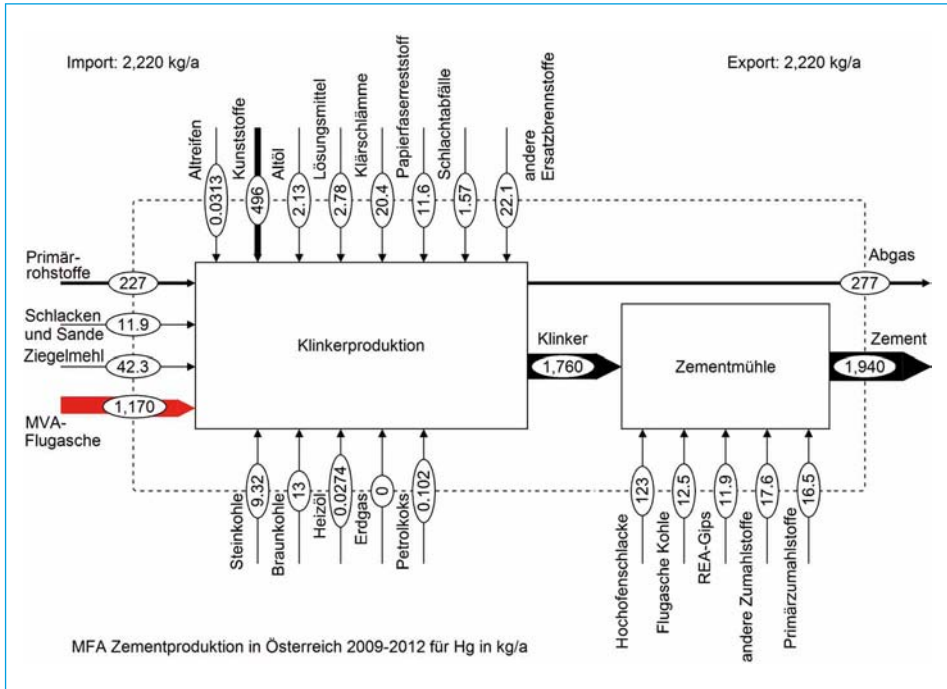


Bild 9: Durchschnittliche Massenflüsse für Quecksilber in der Zementproduktion in Österreich nach Einbringung von MVA-Flugaschen in kg/a

In Tabelle 3 werden nochmals die wichtigsten Ergebnisse der Arbeit bezüglich der Auswirkungen von MVA-Flugaschen auf die Schwermetallgehalte in Zement zusammengefasst.

Tabelle 3: Gehalte von Schwermetallen in Zementen

	Einheit	Cadmium	Chrom	Quecksilber
Berechnete Konzentrationen im Zement bei derzeitigem Energie- und Rohstoffmix	mg/kg	0,70	71	0,21
Berechnete Konzentrationen im Zement nach MVA-Asche Einbringung (Szenario 1)	mg/kg	3,61	74	0,43
Steigerung der Konzentration im Zement durch MVA-Asche Einbringung (Szenario 1)	%	+ 415 %	+ 4 %	+ 105 %
Durchschnittliche Konzentrationen im Zement laut Untersuchungen an österreichischen Zementen [33]	mg/kg	0,80	42	nd
Konzentration im Zement [1, 18, 33, 45, 49] min	mg/kg	0,03	41	0,01
Konzentration im Zement [1, 18, 33, 45, 49] mittel	mg/kg	0,40	53	0,15
Konzentration im Zement [1, 18, 33, 45, 49] max	mg/kg	0,70	70	0,37

4. Diskussion und Schlussfolgerungen

Die Ermittlung der durchschnittlichen Schwermetallgehalte in Zementen der österreichischen Zementindustrie zeigt im Vergleich zur Literatur relativ hohe Werte für Cadmium und Chrom, jedoch nur mittlere für Quecksilber (Tabelle 3). Zwar befinden sich alle Zahlen noch innerhalb der Bandbreite der Literaturwerte, jedoch sind sie auch mit Unsicherheiten behaftet. Ein möglicher Grund für diese relativ hohen berechneten Werte in dieser Studie ist das Alter der im Vergleich verwendeten Literaturdaten. Diese stammen zum Großteil noch aus den 1990er Jahren, also aus einer Zeit, wo der Einsatz an Ersatzbrennstoffen um einiges geringer als heute war. Dass eben diese Ersatzbrennstoffe hauptbestimmend für den Eintrag bestimmter Stoffe wie Quecksilber oder Cadmium sind, zeigen nicht nur diese, sondern auch andere, Studien. [18, 20]

Bemerkenswert wäre jedoch der Anstieg der Gehalte von Cd und Hg durch die Einbringung von Flugaschen aus österreichischen MVAs mit Rostfeuerung. Zwar trüge die MVA-Flugasche nur ein Prozent zum Rohstoffmix und somit zur Zementproduktion bei, jedoch wäre ihr Anteil am Beitrag zum Endgehalt der betrachteten Schwermetalle achtzig Prozent für Cadmium und sechzig Prozent für Quecksilber. Zwar sind diese in der Zementmatrix, wie viele Studien zeigen, relativ gut gebunden. Eine starke Akkumulation findet jedoch statt und es gilt demnach auch zu untersuchen, ob eine mögliche Beimengung von MVA-Flugaschen in der Zementproduktion zu späteren Betonabbruchmaterialien führt, die den Grenzwerten der Gesamtgehalte von Schwermetallen für Recyclingbaustoffe noch entsprechen würden.

Die Literatur zur Verwendung von MVA-Flugaschen in der Zementproduktion ist sich jedoch auch einig, dass eine bestimmte Vorbehandlung, insbesondere Flugaschenwäsche, alleine schon zur Reduktion der betonschädigenden Salzgehalte in den Aschen notwendig ist. Welche Auswirkungen diese auch auf die Schwermetallgehalte der gewaschenen Aschen hat, soll Teil weiterer Untersuchungen sein.

5. Literatur

- [1] Anger, L.; Clement, D.; Hammer, K.: 2011. Konzept zur nachhaltigen Nutzung von Baurestmassen basierend auf der thematischen Strategie für Abfallvermeidung und Abfallrecycling der EU (Projekt EnBa). ACTION 7.2 Operationalisierung der thematischen Strategie für Abfallvermeidung und -recycling für Baurestmassen II: Einführung des Lebenszyklusdenkens auf der (Werk-) Stoffebene. Endbericht. Technische Universität Wien: Institut für Wassergüte, Ressourcenmanagement und Abfallwirtschaft.
- [2] Aubert, J. E., B. Husson, A. Vaquier. 2004. Use of municipal solid waste incineration fly ash in concrete. *Cement and Concrete Research* 34/6: 957-963.
- [3] Aubert, J. E.; Husson, B.; Sarramone, N.: Utilization of municipal solid waste incineration (MSWI) fly ash in blended cement: Part 2. Mechanical strength of mortars and environmental impact. *Journal of Hazardous Materials* 146/1-2: 12-19, 2007
- [4] Bally, A.: Altreifenentsorgung. Was ist ökologisch sinnvoll? Kreuzlingen, 2003
- [5] Böhmer, S.: Abfallverbrennung in Österreich: Statusbericht 2006. Umweltbundesamt, 2007
- [6] Böhmer, S.; Rumpfmayr, A.; Rapp, K.; Baumgartner, A.: Mitverbrennung von Klärschlamm in kalorischen Kraftwerken. Wien: Umweltbundesamt, 2001

- [7] Boubela, G.; Wurst, F.; Prey, T.; Boos, R.: Materialien zur thermischen Behandlung und Verwertung von Abfällen und Reststoffen in der Zellstoff-, Papier-, Span- und Faserplattenindustrie. BE- 248. Wien: Umweltbundesamt, 2004
- [8] Brameshuber, W.; Vollpracht, A.: Erarbeitung eines Grundsatzpapiers zur Feststellung der Umweltverträglichkeit von genormten Betonausgangsstoffen. Forschungsbericht F 836. Stuttgart: Institut für Bauforschung Aachen, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule, 2003
- [9] Braun, H.: Sekundärbrennstoffeinsatz in der Zementindustrie-vom Altreifen bis zum Tiermehl. Vortrag auf der XVII. Gesteinshüttencolloquium, Leoben, 2001
- [10] Brunner, P. H.; Rechberger, H.: Practical Handbook of Material Flow Analysis. Boca Raton: Lewis Publishers, 2004
- [11] Carignan, J.; Libourel, G.; Cloquet, C.; Le Forestier, L.: Lead Isotopic Composition of Fly Ash and Flue Gas Residues from Municipal Solid Waste Combustors in France: Implications for Atmospheric Lead Source Tracing. *Environmental Science & Technology* 39/7: 2018-2024, 2005
- [12] Cascarosa, E.; Gea, G.; Arauzo, J.: Thermochemical processing of meat and bone meal: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16/1: 942-957, 2012
- [13] Cencic, O.; Rechberger, H.: Material flow analysis with software STAN. *Journal of Environmental Engineering and Management* 18/1: 3, 2008
- [14] Cencic, O.; Kelly, J. D.; Kovacs, A.: (ed. 2.5 (Beta)). STAN (subSTANCE flow ANALYSIS). Vienna: Helmut Rechberger and Oliver Cencic, Institute for Water Quality, Resources and Waste Management, Vienna University of Technology, 2012
- [15] Chernousov, P. I.; Golubev, O. V.: Verhalten von Mikroelementen im Hochofen. Saarbrücken: LAP Lambert Academic Publishing, 2011
- [16] Collivignarelli, C.; Sorlini, S.: Reuse of municipal solid wastes incineration fly ashes in concrete mixtures. *Waste Management* 22/8: 909-912, 2002
- [17] Denner, M.: Ermittlung der Einflüsse von alternativen chemisch-analytischen Aufarbeitsverfahren auf die Bewertung von festen Ersatzbrennstoffen *EBS-Analytik*. REP-0125. Wien: Umweltbundesamt, 2009
- [18] Dr. Graf AG: Regelungen über die Abfallentsorgung in Zementwerken. Grundlagen, Methoden, Berechnung. Bern: Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), 1998
- [19] Ecke, H.: Sequestration of metals in carbonated municipal solid waste incineration (MSWI) fly ash. *Waste Management* 23/7: 631-640, 2003
- [20] Fehring, R.; Rechberger, H.; Brunner, P.: Positivlisten für Reststoffe in der Zementindustrie: Methoden und Ansätze (PRIZMA). Endbericht, im Auftrag der Vereinigung der österreichischen Zementindustrie. Wien, Dezember 1999
- [21] Ferreira, C.; Ribeiro, A.; Ottosen, L.: Possible applications for municipal solid waste fly ash. *Journal of Hazardous Materials* 96/2-3: 201, 2003
- [22] Gao, X.; Wang, W.; Ye, T.; Wang, F.; Lan, Y.: Utilization of washed MSWI fly ash as partial cement substitute with the addition of dithiocarbamic chelate. *Journal of Environmental Management* 88/2: 293-299, 2008
- [23] Garcia, R. A.; Rosentrater, K. A.: Concentration of key elements in North American meat & bone meal. *Biomass and Bioenergy* 32/9: 887-891, 2008
- [24] Grech, H.; Angerer, T.; Scheibengraf, M.: Bestandsaufnahme der thermischen Entsorgung von verarbeiteten tierischen Proteinen in Österreich. BE-192. Wien: Umweltbundesamt, 2001
- [25] Iddles, D.; Chapman, C.; Forde, A.; Heanley, C.: The plasma treatment of incinerator ashes. BOOK-INSTITUTE OF MATERIALS 642: 29WTI-36WTI, 1996
- [26] Karlfeldt-Fedje, K.: Metals in MSWI ash—problems or opportunities? 2012
- [27] Katsuura, H.; Inoue, T.; Hiraoka, M.; Sakai, S.: Full-scale plant study on fly ash treatment by the acid extraction process. *Waste Management* 16/5-6: 491-499, 1996

- [28] Kikuchi, R.: Recycling of municipal solid waste for cement production: pilot-scale test for transforming incineration ash of solid waste into cement clinker. *Resources, Conservation and Recycling* 31/2: 137-147, 2001
- [29] Krebs, W.; Brombacher, C.; Bosshard, P. P.; Bachofen, R.; Brandl, H.: Microbial recovery of metals from solids. *Fems Microbiology Reviews* 20/3-4: 605-617, 1997
- [30] Kügler, I.; Öhlinger, A.; Walter, B.: *Dezentrale Klärschlammverbrennung*. BE-260. Wien: Umweltbundesamt, 2004
- [31] Mauschitz, G.: *Emissionen aus Anlagen der österreichischen Zementindustrie-Berichtsjahr 2012*. Wien: Technische Universität Wien, 2013
- [32] Möller, U. J.: *Altölentsorgung durch Verwertung und Beseitigung*. Renningen: Expert-Verlag, 2004
- [33] Murphy, R. F.: *Experimental investigation into the heavy metals content in construction materials*. Technische Universität Wien, 2013
- [34] Nagib, S.; Inoue, K.: Recovery of lead and zinc from fly ash generated from municipal incineration plants by means of acid and/or alkaline leaching. *Hydrometallurgy* 56/3: 269-292, 2000
- [35] Nonte, W.: *Einsatz mineralischer Abfälle in Bauprodukten – Abfallwirtschaftliche Aspekte*, undated
- [36] Pan, J. R.; Huang, C.; Kuo, J.-J.; Lin, S.-H.: Recycling MSWI bottom and fly ash as raw materials for Portland cement. *Waste Management* 28/7: 1113-1118, 2008
- [37] Quina, M. J.; Bordado, J. C.; Quinta-Ferreira, R. M.: Treatment and use of air pollution control residues from MSW incineration: An overview. *Waste Management* 28/11: 2097-2121, 2008
- [38] Rémond, S.; Pimienta, P.; Bentz, D. P.: Effects of the incorporation of Municipal Solid Waste Incineration fly ash in cement pastes and mortars: I. Experimental study. *Cement and Concrete Research* 32/2: 303-311, 2002a
- [39] Rémond, S.; Pimienta, P.; Bentz, D. P.: Effects of the incorporation of Municipal Solid Waste Incineration fly ash in cement pastes and mortars: II: Modeling. *Cement and Concrete Research* 32/4: 565-576, 2002b
- [40] Saikia, N.; Kato, S.; Kojima, T.: Production of cement clinkers from municipal solid waste incineration (MSWI) fly ash. *Waste Management* 27/9: 1178-1189, 2007
- [41] Schlumberger, S.; Schuster, M.; Ringmann, S.; Koralewska, R.: Recovery of high purity zinc from filter ash produced during the thermal treatment of waste and inerting of residual materials. *Waste Management & Research* 25/6: 547-555, 2007
- [42] Shi, H.-S.; Kan, L.-L.: Leaching behavior of heavy metals from municipal solid wastes incineration (MSWI) fly ash used in concrete. *Journal of Hazardous Materials* 164/2-3: 750-754, 2009
- [43] Skutan, S.; Rechberger, H.: *Bestimmung von Stoffbilanzen und Transferkoeffizienten für die Linie II der MVA Wels*. Final Report. Institute for Water Quality, Resource and Waste Management, Vienna University of Technology, 2007
- [44] VDZ: *Altöl – wo Abfall Wunder wirkt*. Düsseldorf: Verein Deutscher Zementwerke e.V. (VDZ), 1999
- [45] VDZ: *Spurenelemente in deutschen Normzementen 2001*. Düsseldorf: Verein Deutscher Zementwerke e.V. (VDZ), 2001
- [46] Walter, B.; Tesar, M.: *Porosierungsmittel in der österreichischen Ziegelindustrie. Herkunft und Einsatz*. REP-0244. Wien: Umweltbundesamt, 2009
- [47] Winter, B.; Szednyj, I.; Reisinger, H.; Böhmer, S.; Janhsen, T.: *Abfallvermeidung und -verwertung: Aschen, Schlacken und Stäube in Österreich*. Wien: Umweltbundesamt, 2005
- [48] Wu, K.; Shi, H.; Guo, X.: Utilization of municipal solid waste incineration fly ash for sulfoaluminate cement clinker production. *Waste Management* 31/9-10: 2001-2008, 2011
- [49] Zeschmar-Lahl, B.: *Schadstoffanreicherung im Erzeugnis aufgrund des Einsatzes von Ersatzbrennstoffen in Zementwerken und Feuerungsanlagen*. Dissertation Technical University of Berlin, 2003



Minimierung von Emissionen thermischer Anlagen

- Rauchgasreinigungsanlagen
- Abwasser, Flugasche- und Rückstandsbehandlung
- Rostasche-Recycling

Marktführer in Europa
Ein großes Portfolio an verfügbaren Verfahren
Über 200 Fachleute

Kontakt Rauchgasreinigung:
LAB GmbH
Bludenzer Straße 6
D-70469 Stuttgart
Tel.: +49-711-222 49 35-0
Fax.: +49-711-222 49 35 99
Email: labgmbh@labgmbh.com

Engineering

Schlüsselfertige Installation
Service • Betrieb • Additive

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.dnb.de> abrufbar

Thomé-Kozmiensky, K. J. (Hrsg.): **Mineralische Nebenprodukte und Abfälle 2**
– Aschen, Schlacken, Stäube und Baurestmassen –
ISBN 978-3-944310-21-3 TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky

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

Verlag: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky • Neuruppin 2015
Redaktion und Lektorat: Professor Dr.-Ing. habil. Dr. h. c. Karl J. Thomé-Kozmiensky,
Dr.-Ing. Stephanie Thiel, Elisabeth Thomé-Kozmiensky, M.Sc.
Erfassung und Layout: Ginette Teske, Sandra Peters, Janin Burbott,
Claudia Naumann-Deppe, Anne Kuhlo

Druck: Mediengruppe Universal Grafische Betriebe München GmbH, München

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

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

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