

71/2016

Purgar, A.; Huber, F.; Blasenbauer, D.; Winter, F. (2016)  
„Alternative Behandlungskonzepte für Flugaschen aus der  
Abfallverbrennung“, *ÖIAZ, Österreichische Ingenieur- und  
Architekten-Zeitschrift*, Vol. 161, 1–12, p. 75-81.





# Alternative Behandlungskonzepte für Flugaschen aus der Abfallverbrennung

## Alternative Concepts for the Treatment of Fly Ash from Solid Waste Incineration

Von A. Purgar, F. Huber, D. Blasenbauer und F. Winter, Wien

Mit 3 Abbildungen und 1 Tabelle



Dipl.-Ing.  
Dr.techn. Amon Purgar



Dipl.-Ing.  
Florian Huber



Dominik Blasenbauer,  
BSc



Ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing.  
Dr.techn. Franz Winter

### Kurzfassung

Rückstände aus der thermischen Verwertung von Abfällen werden gemäß österreichischen als auch europäischen Rechtsnormen als gefährliche Abfälle klassifiziert. Damit unterliegen sie sämtlichen Vorschriften für gefährliche Abfälle was Behandlung, Entsorgung und Transport betrifft. Während der Nachweis der Nicht-Gefährlichkeit für Schlacken in den meisten Fällen geführt werden kann, stellen Flugaschen bezüglich ihrer nachhaltigen und ressourcenschonenden Entsorgung bzw. weiteren Behandlung eine große Herausforderung dar. In dieser Arbeit werden für Österreich repräsentative Flugascheströme aus der Abfallverbrennung charakterisiert und anschließend untersucht, welche Möglichkeiten zur alternativen Behandlung dieser Flugaschen bestehen. Die Auswahl der dabei betrachteten Verfahren orientiert sich an der europäischen Abfallhierarchie, wobei sowohl Maßnahmen zur qualitativen Abfallvermeidung, zum stofflichen Recycling und zur Beseitigung untersucht wurden.

### Abstract

European Union and Austrian legislation classifies residues from waste incineration as hazardous waste. Therefore, the treatment, disposal and the transport of those residues are subject to the regulations concerning hazardous waste. While in most cases the bottom ash can be reclassified as non-hazardous waste, fly ash is more challenging regarding sustainable and resource saving disposal or treatment methods. Within this work, fly ash flows from typical Austrian waste incineration facilities are under investigation for potential alternative treatment methods. With focus on the waste hierarchy of the European Union, treatment methods were chosen in accordance to measures for qualitative waste prevention, material recycling and disposal.

### 1. Einleitung

Die Abfallverbrennung weist eine mehr als hundertjährige Geschichte auf und stellt mit mehr als vierhundert An-

lagen in Europa ein zentrales Element der Abfallwirtschaft dar (Thome-Kozmiensky, 2014). Im Jahr 2011 wurden in der Europäischen Union etwa 23% der Siedlungs- und Gewerbeabfälle thermisch behandelt, was rund 78 Millionen Tonnen jährlich entspricht (Fellner J., 2014). Demgegenüber stehen rund 34% des Abfalls, der unbehandelt deponiert wird und etwa 43%, die einem Recycling zugeführt werden (Kleppmann, 2014). Gemäß der Abfallrahmenrichtlinie 2008/98/EC (EU, 2008) wird das Verfahren der Abfallverbrennung in der Hierarchie der Abfallwirtschaft zwar über der Beseitigung aber unter diversen Recyclingverfahren gereiht. Durch den Ausschluss der energetischen Verwertung aus der Definition des Recyclings (Stoffe werden hier entweder für den ursprünglichen Zweck oder für andere Zwecke aufbereitet) ist die Abfallverbrennung, wie sie in Österreich in zwölf Standorten betrieben wird, von der höher gereihten Stufe der Hierarchie der Abfallwirtschaft ausgeschlossen. Dass Abfallverbrennungsanlagen neben der Bereitstellung von Wärme (als Prozessdampf oder Fernwärme) und/oder elektrischer Energie auch einen Beitrag zum stofflichen Recycling leisten können wird oft vernachlässigt, ist aber Gegenstand vieler internationaler Forschungsgruppen. Während vielerorts die Schlacken von Rostfeuerungsanlagen oder Bettaschen von Wirbelschichtverbrennungsanlagen im Fokus derartiger Untersuchungen stehen (Thome-Kozmiensky, 2013), stehen in dieser Arbeit die Flugaschen der Abfallverbrennung im Mittelpunkt der Untersuchungen. Das Ziel des gegenständlichen Beitrags ist es, alternative Konzepte der Behandlung von Flugaschen aus der Abfallverbrennung zu diskutieren und zu evaluieren inwiefern diese Verfahren geeignet sind, um zur Ressourcenschonung in der Abfallwirtschaft beizutragen. Im Konkreten wird dazu die Zusammensetzung von Flugaschen verschiedener Müllverbrennungsanlagen in Österreich analysiert und darauf basierend die Anwendbarkeit der ausgewählten Behandlungsverfahren diskutiert. Die Auswahl der betrachteten Verfahren erfolgte vor dem Hintergrund der Abfallhierarchie, wobei im Fokus der Untersuchungen Konzepte stehen, die einerseits eine Ressourcennutzung der in den Aschen enthaltenen Materialien

erlauben (Recycling) und die andererseits eine Deponierung der dabei anfallenden Rückstände auf einer Reststoffdeponie gestatten (Entsorgung). Ebenso werden Möglichkeiten untersucht, die die Entstehung gefährlicher Abfälle verringern (Abfallvermeidung). Daher werden ausgewählte Verfahren und Methoden der Flugascheverwertung vorgestellt und sukzessiv auf die untersuchten Flugascheströme angewendet, um ihre Eignung zur Ressourcenschonung zu untersuchen.

2. Materialien und Methoden

2.1. Flugasche Definition

Aus historischer Sicht ist der Ausdruck „Flugasche“ sehr allgemein für disperse Aschen und Sorptionsmittel mit kleinen Partikeldurchmessern verwendet worden, welche in den Rauchgasreinigungsanlagen zurückblieben. Da sich diese Rückstände, die teilweise getrennt aus der Anlage abgezogen werden, in ihrer chemischen und physikalischen Zusammensetzung voneinander stark unterscheiden, ist es zu bevorzugen den jeweiligen Strom nach seiner Herkunft (Gewebefilter, Kessel, usw.) zu bezeichnen (Chandler, et al., 1997). Demzufolge wird in dieser Arbeit folgende Nomenklatur verwendet:

*Kesselasche* bezeichnet jenes feinkörnige Material, das während des Betriebs einer Anlage aus den Wärmetauscherzügen abgezogen wird. Ofenausbrüche und Anbackungen an Wärmetauscherflächen werden hier nicht berücksichtigt. Werden mehrere Fraktionen an Kesselasche gewonnen, so können diese analog als Überhitzerasche, Economizerasche, etc. bezeichnet werden. (Siehe Abb. 1, D)

*Filterasche* bezeichnet jenes feinkörnige Material, welches in den Gewebefiltern oder elektrostatischen Abscheidern aus dem Rauchgas der Verbrennungsanlage abgeschieden wird. Festzuhalten ist, dass Kesselasche nicht Bestandteil der Filterasche ist. (siehe Abb. 1, F)

In vielen Abfallverbrennungsanlagen können aus baulichen und anderen Gründen Kessel- und Filteraschen nicht separat ausgetragen werden. Rückstände bestehend aus Kessel- und Filterasche in unbekanntem Verhältnis werden in dieser Arbeit als *Flugasche* bezeichnet.

Die oben beschriebenen Flugaschen (Filter- und Kesselasche) waren nach Festsetzungsverordnung für gefährliche Abfälle (Festsetzungsverordnung, 1997) als „Flugaschen und -stäube aus Abfallverbrennungsanlagen (Abf.Nr. 31309)“ zu bezeichnen und als gefährliche Abfälle ausgewiesen, das heißt Flugaschen aus Abfallverbrennungsanlagen wurden generell als gefährliche Abfälle klassifiziert und unterlagen infolgedessen sämtlichen Rechtsvorschriften für gefährliche Abfälle. Die Festsetzungsverordnung (1997) wurde durch die Abfallverzeichnisverordnung (2003) teilweise materiell derogiert (WKO, 2013). Das Prozedere der Ausstufung ist nach wie vor in der Festsetzungsverordnung (1997) geregelt, jedoch werden nun durch die Abfallverzeichnisverordnung (2003) folgende Punkte neu geregelt:

- FAestlegung welche Abfälle gefährlich sind (Abfallverzeichnisverordnung, 2003), Anlage 2
- *Definition* gefahren-relevanter Eigenschaften (Abfallverzeichnisverordnung, 2003), Anlage 3

Demzufolge können die hier behandelten Flugaschen dem Kapitel 19 der (Abfallverzeichnisverordnung, 2003) „Abfälle aus Abfallbehandlungsanlagen, öffentlichen Abwasserbehandlungsanlagen sowie der Aufbereitung von Wasser für den menschlichen Gebrauch und Wasser für industrielle Zwecke“ zugeordnet werden. Dieses Kapitel enthält das Unterkapitel 19.01 „Abfälle aus der Verbrennung oder Pyrolyse von Abfällen“, das folgende Einträge ausweist, wobei die mit \* gekennzeichneten Einträge als gefährlich anzusehen sind:

- 19.01.13: Filterstaub, der gefährliche Stoffe enthält \*
- 19.01.14: Filterstaub mit Ausnahme desjenigen, der unter 19.01.13 fällt
- 19.01.15: Kesselstaub, der gefährliche Stoffe enthält \*
- 19.01.16: Kesselstaub mit Ausnahme desjenigen, der unter 19.01.15 fällt

2.2. Untersuchte Flugascheströme

Derzeit stehen in Österreich zwölf Anlagen zur thermischen Verwertung von Abfällen zur Verfügung, wobei Anlagen zur Mitverbrennung von Abfällen nicht berücksichtigt sind. Zusammen

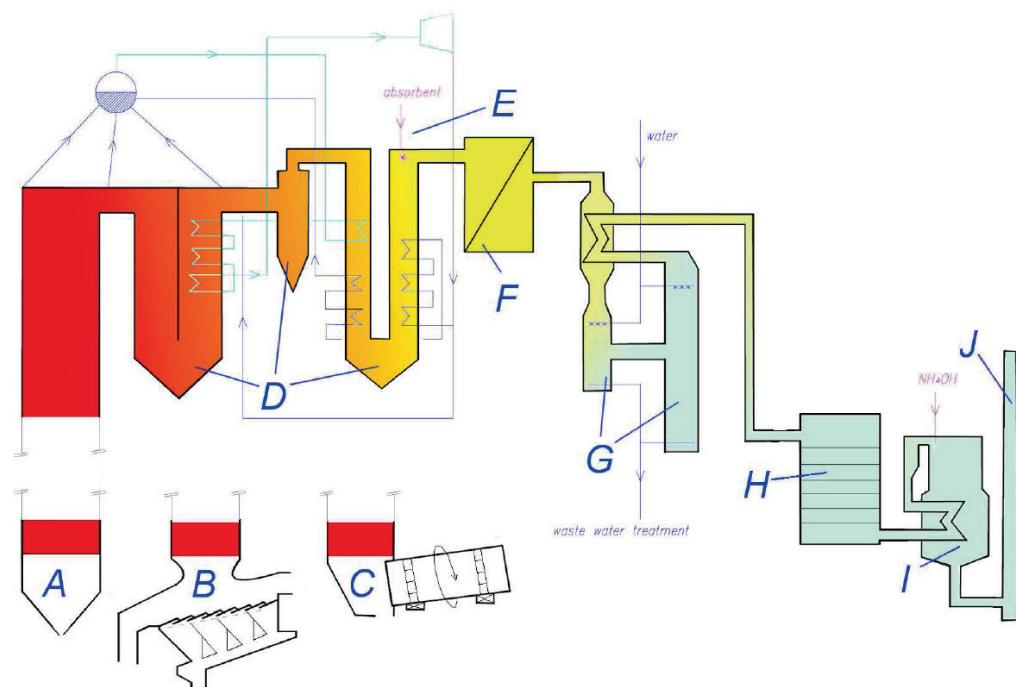


Abb. 1: Skizze der Komponenten untersuchter Abfallverbrennungsanlagen. A) Wirbelschicht; B) Rostfeuerungs; C) Drehrohr-ofen; D) Wärmeübergangzone und Schwerkraftabscheider; E) Flugstromadsorber; F) Elektrostatischer Abscheider oder Gewebefilter; G) Nasse Rauchgaswäsche; H) Polzeifilter; I) Selektive Katalytische Reduktion – DeNOx; J) Kamin.

Fig. 1: Scheme of the components of the investigated waste incineration facilities. A) fluidised bed combustor; B) grate furnace; C) rotary kiln; D) boiler flues and gravity separator; E) activated coke injection; F) electrostatic precipitator or fabric filter; G) wet flue gas cleaning system; H) control filter; I) selective catalytic reduction –DeNOx; J) chimney.

weisen sie eine Kapazität von über 2.600.000 Tonnen Abfall pro Jahr auf (BAWP, 2011), (Linz AG, 2014). Im Kontext der oben genannten Ziele werden von jenen zwölf österreichischen Verbrennungsanlagen vier, mit einer Kapazität von 1.000.000 t/a, ausgewählt und bezüglich ihrer Flugaschen untersucht. Dies entspricht also mehr als 35% der in Österreich installierten Kapazität.

Diese vier Standorte betreiben gemeinsam 13 Verbrennungslinien. Dabei kommen als Verbrennungstechnologien Wirbelschichtverbrennungsanlagen, Rostfeuerungen aber auch Drehrohröfen zum Einsatz. Eingesetzte Abfälle sind Siedlungsabfälle, siedlungsabfallähnliche Gewerbeabfälle, Ersatzbrennstoffe (aus mechanischer Restmüllsplittung), gefährliche Abfälle aber auch Klärschlämme. Als Rauchgasreinigungssystem kommen an allen Standorten nasse Rauchgasreinigungsverfahren und eine selektive katalytische Reduktion zum Einsatz. Diese sind mit Gewebe- oder elektrostatischen Abscheidern ausgestattet. Auch wird das Rauchgasreinigungssystem durch Polizeifilter (Festbett-Aktivkohle-Filter) oder Flugstromadsorber (Herdofenkoks) ergänzt. Die hier beschriebenen Abfallverbrennungsanlagen sind repräsentativ für die österreichische Abfallverbrennungsinfrastruktur, da nur in einer Anlage in Österreich eine trockene anstatt einer nassen Rauchgasreinigung durchgeführt wird (Böhmer S., 2006) und daher in dieser Anlage generell andere Flugasche-Eigenschaften zu erwarten sind. Die Eigenschaften von Flugaschen der Abfallverbrennung variieren von Standort zu Standort und werden durch Abfallinput, verwendete Verbrennungstechnologie aber auch durch die Art der installierten Rauchgasreinigung beeinflusst (Purgar A., 2013), (Quina M., 2007). Daher werden die hier generierten Flugascheströme nach Verbrennungstechnologie, Abfallinput und Rauchgasreinigungssystem klassifiziert und einzeln betrachtet. Eine Übersicht der betrachteten sieben Flugascheströme findet sich in Tab. 1.

2.3. Charakterisierung von Flugaschen

Im Zeitraum 2009–2012 wurden nahezu täglich Proben aus diesen 7 Flugascheströmen gezogen und je Flugascheström zu Monatsmischproben vereinigt, welche im Zuge der grundlegenden Charakterisierung von Abfällen einer chemischen Analyse unterzogen wurden. Dabei wurden die Gesamtgehalte der Metalle Ag, Ni, Cu, Cd, Pb, Sb, Zn, Co, Mo, Sn mittels Königswasserauszug (EN13657, 2012) und anschließender Analyse mittels (EN11885, 2009) ermittelt, siehe Abb. 3. Weiters wurde das Eluierverhalten der Flugaschen untersucht und mit Grenzwerten der Deponieverordnung für die Ablagerung auf einer Reststoffdeponie verglichen. Jene Parameter, die einer Ablagerung auf einer Reststoffdeponie im unbehandelten Zustand entgegenstehen, sind in Tab. 1 angeführt. Zur Herstellung der Eluate wurde die Norm (EN12457-4, 2003) herangezogen. Die Analyse der Eluate erfolgt wiederum nach der Norm (EN11885, 2009) für die Elemente Sb, As, Ba, Pb, Cd, Cr, Co, Cu, Mo, Ni, Se, Ag, Zn und Sn. Quecksilber wird mittels Kaltdampf-AAS (Atomabsorptionsspektroskopie) untersucht und der Abdampfrückstand nach der Norm (EN15216, 2008). Zusätzlich wurde der pH-Wert der Eluate ermittelt und die Flugaschen mittels RFA (Röntgenfluoreszenzanalyse) auf ihre Zusammensetzung bezüglich der Elemente Ca, Al, Fe, Si, S, Cl, Na, K und P untersucht, siehe Abb. 2.

2.4. Methodik

Mit den beschriebenen und charakterisierten Flugaschen wird versucht unter Einbeziehung ihrer Herkunft und unter Berücksichtigung der Abfallhierarchie folgende Behandlungskonzepte hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit und ihres Potentials zur Ressourcenschonung zu diskutieren:

**Tab. 1:** Übersicht über die untersuchten Flugascheströme: SA) Siedlungsabfall; EBS) Ersatzbrennstoff; KS) Klärschlamm; GA) gefährlicher Abfall; FA) Flugasche; \*Eigenschaften einer Flugasche die einer Ausstufung zum Zweck der Deponierung auf einer Reststoffdeponie unter Berücksichtigung von § 8 DVO entgegenstehen: E:Pb) Bleigehalt im Eluat (30 mg/kg); E:Cd) Cadmiumgehalt im Eluat (1mg/kg); E:Zn) Zinkgehalt im Eluat (100 mg/kg); TDS) Abdampfrückstand (100.000 mg/kg); G:Hg) Gesamtgehalt Quecksilber (20 mg/kg); ESP) Elektrostatischer Abscheider; GF) Gewebefilter; SCR) Selektive Katalytische Reduktion.

**Tab. 1:** Overview of the investigated fly ash flows: SA) municipal solid waste; EBS) refuse derived fuel; KS) sewage sludge; GA) hazardous waste; FA) fly ash; \*Properties of fly ash which prevent a declassification for the purpose of a disposal on a landfill for non-hazardous waste considering § 8 of the Austrian landfill ordinance (DVO 2008): E:Pb) Lead concentration in the eluate (30 mg/kg); E:Cd) Cadmium concentration in the eluate (1 mg/kg); E:Zn) Zinc concentration in the eluate (100 mg/kg); TDS) total dissolved solids (100.000 mg/kg); G:Hg) total content of Mercury (20 mg/kg); ESP) electrostatic precipitator; GF) fabric filter; SCR) selective catalytic reduction.

Nr.	Abfallart	Verbrennungstechnologie	Flugaschentyp	Flugstromadsorber	Filterart	Anzahl der Wäscher	Polizeifilter	SCR	DVO relevante Parameter *
FA 1	SA	Rostfeuerung	Kesselasche		ESP	2	Ja	Ja	E:Pb
FA 2	SA	Rostfeuerung	Filterasche		ESP	2	Ja	Ja	TDS
FA 3	SA	Rostfeuerung	Flugasche		ESP	2		Ja	TDS, E:Pb
FA 4	SA	Rostfeuerung	Flugasche	Ja	GF	2		Ja	G:Hg, TDS, E:Pb
FA 5	EBS	Wirbelschicht	Flugasche		ESP	2	Ja	Ja	
FA 6	KS	Wirbelschicht	Flugasche		ESP	2	Ja	Ja	
FA 7	GA	Drehrohröfen	Flugasche		ESP	2	Ja	Ja	TDS, E:Pb,Cd,Zn



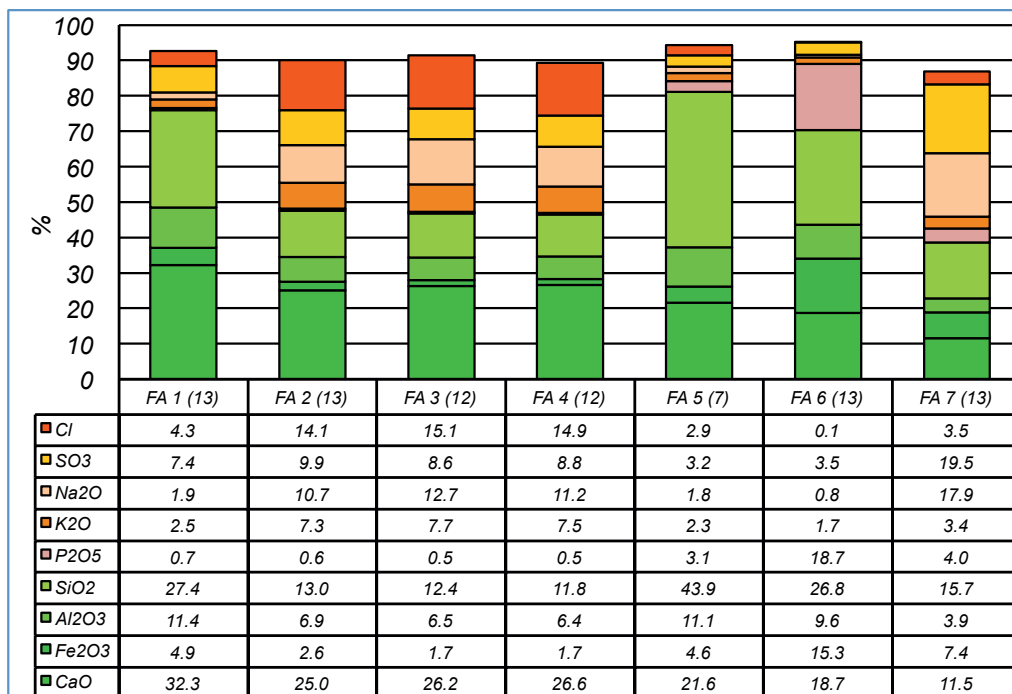


Abb. 2: Gesamtgehalte Ca, Al, Fe, Si, S, Cl, K und P dargestellt als Oxide in Prozent. ( ) Anzahl der Stichproben

Fig. 2: Total content of Ca, Al, Fe, Si, S, Cl and P shown as oxides in percent. ( ) Number of samples

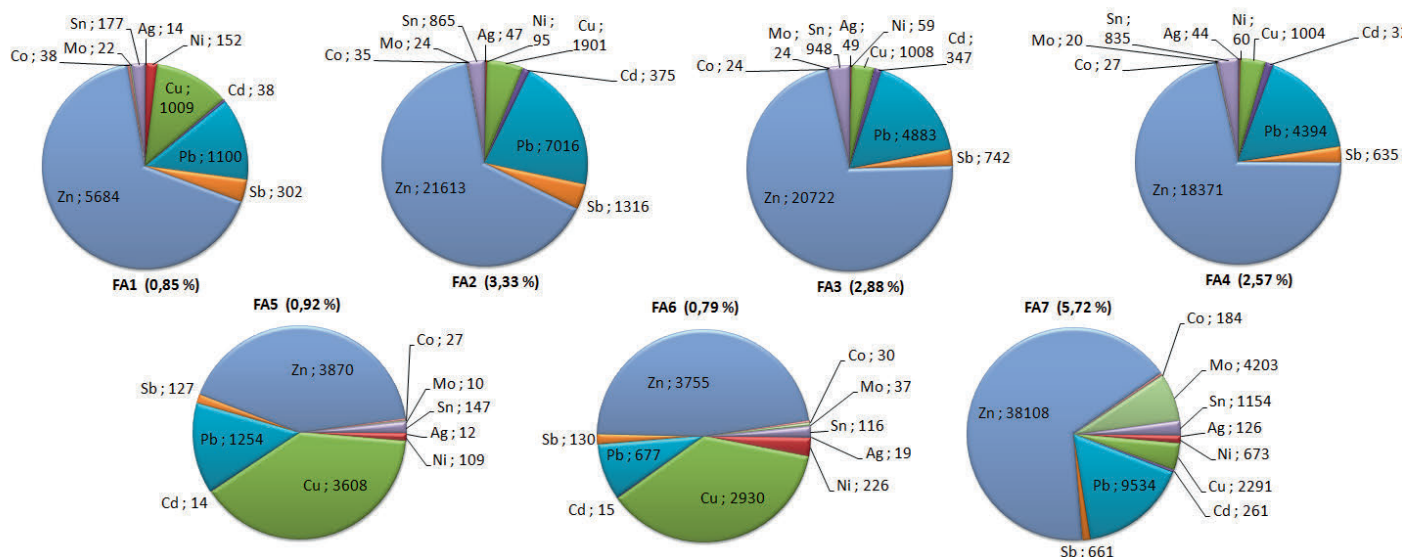


Abb. 3: Gesamtgehalt der Elemente Ag, Ni, Cu, Cd, Pb, Sb, Zn, Co, Mo, Sn in mg/kg je Flugasche und Summe dieser Metalle in Massen-% (Angaben in Klammer).

Fig. 3: Total content of Ag, Ni, Cu, Cd, Pb, Sb, Zn, Co, Mo, Sn in mg/kg for each fly ash flow and sum of all those metals in m% (values in brackets).

Die 7 untersuchten Flugascheströme werden als neuer Abfallstrom betrachtet und in Anlehnung an die Hierarchie der Abfallwirtschaft (AWG, 2002) wird als erstes Mittel – das auf den nun neu betrachteten Abfallstrom anzuwenden ist – versucht, die Abfallvermeidung zu praktizieren. Nachdem im Rahmen des gegenständlichen Artikels die Inputseite der Abfallverbrennung nicht diskutiert wird, wird im Sinne des AWG (2002) versucht den Schadstoffgehalt in einem Reststoffstrom zu verringern. Für organische Bestandteile würde dies z.B. die Erhöhung des Ausbrandes bedeuten. Die Konzentration anorganischer Schadstoffe wie Quecksilber, Cadmium oder Blei, die nicht durch Oxidation in ungefährliche Stoffe umgewandelt werden können, lässt sich jedoch nur senken, indem entweder die vorhandene

Schadstoffmasse zum Großteil in einen ersten Reststoffstrom transferiert wird, sodass die Konzentration in einem zweiten Reststoffstrom sinken kann, oder indem der gesamte Massenstrom eines Reststoffstroms bei gleichbleibendem Schadstoffmassenstrom erhöht wird. Letzteres ist jedoch nicht im Sinne der Abfallvermeidung. In Müllverbrennungsanlagen können durch das getrennte Abziehen von Kessel- und Filterasche zwei Reststoffströme mit unterschiedlichen Schadstoffgehalten geschaffen werden.

Sind die Mittel der Abfallvermeidung ausgeschöpft, werden Möglichkeiten des stofflichen Verwertens bzw. des Recyclens diskutiert. Neben anderen vielversprechenden und derzeit in der Entwicklung stehenden Verfahren und Verwertungsmöglichkei-

ten werden in dieser Arbeit 3 Ansätze verfolgt: 1. Die Verwertung von Flugaschen in der Zementindustrie als Zuschlagstoff oder als Rohmehlersatz. Dabei wird die generelle Eignung auf Basis von (Duda, 1985) und Beschränkungen bezüglich vorhandenen Kontaminationen auf Basis von (BUWAL, 2005) diskutiert. 2. Die Eignung von Flugaschen als phosphorbasierendes Düngemittel oder als Ausgangsprodukt des selbigen auf Basis von (Egle, Rechberger, & M., 2013). 3. Die Rückgewinnung des Metalls Zn als Reinstoff mit dem FLUREC-Verfahren, beschrieben in (Schlumberger & Bühler, 2013) und (Fellner J., 2014).

Als letzter Schritt werden Entsorgungswege diskutiert, wobei Möglichkeiten der Ressourcenschonung prioritären Stellenwert einnehmen.

### 3. Resultate

#### 3.1. Vermeidung

##### 3.1.1. Trennung von Kessel und Filterasche (qualitative Abfallvermeidung)

Die Flugaschen 1 und 2 entstammen derselben Abfallverbrennungsanlage und fallen im Verhältnis 1:1 an. In Abbildung 3 ist deutlich zu erkennen, dass die Kesselasche (FA 1) im Vergleich zur dazugehörigen Filterasche (FA 2) geringere Konzentrationen an Schwermetallen aufweist. Zu erklären ist dies durch die abnehmende Temperatur entlang des Rauchgaswegs, die für die Kondensation von Metallchloriden ausschlaggebend ist (Born, 2005). So beträgt z.B. die mittlere Pb-Konzentration 1,1 g/kg in der Kesselasche und 7,0 g/kg in der Filterasche (siehe Abbildung 3). In Abbildung 2 ist ersichtlich, dass auch Na, K und Cl vermehrt in der Filterasche gefunden werden können. Eine hohe Konzentration dieser Elemente in einer Flugasche ist verantwortlich für hohe Abdampfdruckstände bei der Untersuchung der Eluate. Daraus kann geschlossen werden, dass die Kesselasche verglichen mit der Filterasche in geringerem Maß mit Schwermetallen kontaminiert ist. Werden die Eluatgehalte zur Beurteilung der Deponierbarkeit des Flugaschestroms auf einer Reststoffdeponie herangezogen, entsprechen beide Flugascheströme nicht den Annahmekriterien in unbehandeltem Zustand (z.B. ohne Zement-Stabilisierung). Während die Filterasche auf Grund des zu hohen Abdampfdruckstands (250.000 mg/kg) nicht unbehandelt deponiert werden darf, wird im Falle der Kesselasche der Parameter Pb im Eluat zumeist überschritten (Mittelwert der Kesselasche-Proben: 100 mg/kg). Grund dafür ist der amphotere Charakter von Pb (Chandler, et al., 1997), der dazu führt, dass Pb bei niedrigen und hohen pH-Werten leicht mobilisierbar ist. Während der pH-Wert des Eluats der Kesselasche bei 12,5 liegt (im Bereich hoher Mobilität), beträgt der pH-Wert des Eluats der Filterasche etwa 11. Dies führt dazu, dass trotz geringerer Konzentrationen von Pb in der Kesselasche, die eluierbare (mobilisierbare) Pb-Menge deutlich höher ist als jene für die Filterasche und auch höher als die Grenzwerte der DVO 2008, was eine Deponierung unbehandelter Kesselaschen aus Abfallverbrennungsanlagen verhindert.

Auch wenn Kesselasche und Filterasche der untersuchten Anlage nicht ohne eine vorhergehende Behandlung auf einer Reststoffdeponie abgelagert werden können, wird durch eine getrennte Erfassung zumindest ein Abfall (Stoffstrom) generiert, der geringere Schadstoffkonzentrationen (als Gesamtgehalt) aufweist. Dies kann für nachfolgende Behandlungsverfahren vorteilhaft sein, da dadurch eine geringeres Ausmaß an Schadstoffentfrachtung zumeist ausreichend ist (z.B. Vorhandensein von Aktivkohleindüsung in der Rauchgasreinigung – Kesselaschen sind in diesem Fall besser für eine Flugaschewäsche geeignet als Filteraschen).

#### 3.2. Recycling

##### 3.2.1. Phosphorrecycling

In (Egle, Rechberger, & M., 2013) werden Verfahren zur Rückgewinnung von Phosphor aus Abwasser und Klärschlamm vorgestellt und verglichen. Dabei werden auch Verfahren diskutiert, welche Phosphor einerseits aus Flugasche rückgewinnen und andererseits auch pflanzenverfügbar machen. Basierend auf den Erkenntnissen von Egle et al. (2013) kann mit Bezug auf Phosphorrückgewinnung Folgendes festgehalten werden: Außer der Flugasche FA 6, die aus der nahezu ausschließlichen Verbrennung von Klärschlamm resultiert, weisen alle der untersuchten Flugaschen einen Phosphatgehalt kleiner 5% auf (siehe Abb. 2) und eignen sich daher nur sehr bedingt als Rohstoff bzw. Ausgangsmaterial zur Herstellung von phosphorbasierendem Düngemittel, da nach (DüngemittelVO, 2004) ein mineralisches Material erst ab einem  $P_2O_5$ -Gehalt von mehr als 10% als Phosphatdünger zu bezeichnen ist. Eine alleinige Entfrachtung von Schwermetallen aus diesen Aschen (FA 1 – FA 5 und FA 7) durch thermische Verfahren, z.B. beschrieben in (Nowak, et al., 2012), wäre für die Generierung eines solchen Produkts nicht ausreichend. Vielmehr wäre es erforderlich, Phosphate selektiv aus der Flugasche abzutrennen um  $P_2O_5$ -Konzentrationen von > 5% zu erzielen. Der dabei entstehende Rückstand müsste wiederum einer Deponierung unterzogen werden.

##### 3.2.2. Verwertung in der Zementindustrie

Neben Sauerstoff sind die Hauptbestandteile der untersuchten Flugaschen Eisen, Calcium, Aluminium und Silicium aber auch Natrium, Kalium und Chlor. Die zuerst genannten Bestandteile (Fe, Si, Al, Ca) sind gleichzeitig die Hauptbestandteile der Primärrohstoffe für Klinker- und Zementprodukte. Im Folgenden soll daher untersucht werden, ob sich die Flugaschen für einen Einsatz als Sekundärrohstoff in der Zementindustrie eignen. In Abb. 2 sind die Zusammensetzungen der untersuchten Flugaschen, in der für die Zementherstellung üblichen Darstellung als Oxide, ersichtlich. In (Duda, 1985) werden übliche Zusammensetzungen für die Ton-, Mergel- und Kalk-Komponenten zur Herstellung von Klinker bzw. Zement angegeben. Daraus ergibt sich aber lediglich eine grundsätzliche Eignung als Sekundärrohstoff in unbehandeltem bzw. dekontaminiertem Zustand. Auch wenn unter bestimmten Bedingungen die Festigkeitseigenschaften des Zements durch eine Beimengung von Flugasche nicht leiden (Hartmann, Koval, Skrobankova, Matysek, Winter, & A., 2014) sprechen folgende Eigenschaften von Flugasche gegen einen Einsatz als Rohmaterial in der Zementindustrie:

- Als Schadstoff nimmt Chlor eine besondere Stellung ein, da es im Prozess selbst durch die notwendige Ausschleusung zu Energieverlusten führt (Duda, 1985) und die Produktqualität negativ beeinflussen kann, wenn es Bestandteil des Rohmehls ist. Flugaschen aus Kohlekraftwerken werden schon seit geraumer Zeit als Zuschlagstoff eingesetzt, daher kann die Norm Flugasche für Beton (EN450-1, 2012) herangezogen werden um den zulässigen Chlorgehalt einzugrenzen, auch wenn in dieser Hausmüll- und Industriemüllverbrennungsaschen explizit vom Geltungsbereich ausgenommen sind. Hier wird für Flugaschen ein Cl-Grenzwert von 0,1 % vorgeschlagen. Abb. 2 kann entnommen werden, dass hier – ausgenommen FA 6 – mit Überschreitungen der Empfehlung gerechnet werden muss.
- Bezüglich Schwermetalle kann man sich an der Richtlinie „Entsorgung von Abfällen in Zementwerken“ des Schweizer Bundesamts für Umwelt, Land und Landschaft (2005) orientieren. In (BUWAL, 2005) werden Richtwerte für Schadstoffe

(wie Schwermetalle) für Abfälle, die in Zementwerken eingesetzt werden, angegeben. Diese Grenzwerte werden mit (GRAF-AG, 1998) begründet und auf Basis zu erwartender Emissionen und Konzentrationen im Klinker ermittelt. Vergleicht man diese Richtwerte mit den Inhaltsstoffen der unbehandelten Flugaschen (siehe Abb. 3), stellt man fest, dass hier zu hohe Werte vorliegen, insbesondere bei Zink, Blei, Antimon und Cadmium.

### 3.2.3. Zink-Recycling

In (Schlumberger & Bühler, 2013) wird das sogenannte FLUREC-Verfahren vorgestellt, das es erlaubt eine Fraktion aus reinem Zn (Zn-Gehalt > 99,9%) und eine Mischfraktion bestehend aus Pb, Cu und Cd aus Flugaschen der Abfallverbrennung abzutrennen. Das Verfahren besteht aus folgenden Schritten: 1. Extraktion von Metallen und leicht löslichen Salzen mit dem sauren Waschwasser der ersten Wäscherstufe der nassen Rauchgasreinigungsanlage, 2. Separation der flüssigen und festen Phase mittels Vakuumbandfilter. Die feste Phase wird wieder in den Müllbunker eingebracht, 3. Der flüssigen Phase (Filtrat) wird Zinkpulver zugegeben um die Metalle Pb, Cu und Cd abzutrennen (Zementierung). 4. Durch eine organische Flüssig-Flüssig Extraktion wird Zn aus dem Filtrat gewonnen, in eine wässrige Phase re-extrahiert und anschließend durch Elektrolyse Zink in Reinstform abgetrennt.

In (Fellner J., 2014) wird eine ökonomische Evaluierung des FLUREC-Verfahrens durchgeführt. Dabei zeigt sich, dass die primäre Intention zur Implementierung des FLUREC-Verfahrens die verminderten Deponierungskosten der gewaschenen Flugaschen darstellen. Erträge aus der Veräußerung der Metallfraktionen sind demgegenüber gering. In (Fellner J., 2014) wird je Tonne behandelte Flugasche eine Einsparung auf Grund der kostengünstigeren Deponierung ohne Stabilisierung von rund 150 € genannt. Die untersuchten Flugaschen weisen Abb. 3 zufolge einen Zinkgehalt von 0,5% bis 3,8% auf. Daraus folgt, dass bei einem aktuellen Marktpreis für Zink von 1,6 €/kg nur 8 bis 61 € je Tonne Flugasche aus den untersuchten Flugaschen zu lukrieren wäre. Die Zahlen ergeben sich unter der Annahme einer Zn-Rückgewinnungsrate von 100%, im Vergleich dazu werden von (Schlumberger & Bühler, 2013) realistische Rückgewinnungsraten von 40 bis 80% angegeben.

Durch Ausführung der Verfahrensschritte 1 und 2 können die Deponierungskosten gesenkt werden und damit wird der primäre ökonomische Nutzen bereits erreicht. Die Verfahrensschritte 3 und 4 dienen der Rückgewinnung von Wertstoffen und bewirken damit eine Schonung von begrenzt vorhanden Ressourcen. Es stellt sich also die Frage, ob diese Ressourcenschonung die höheren Kosten rechtfertigt.

### 3.3. Entsorgung

Können für den Abfallstrom Flugasche keine Vermeidungsmöglichkeiten bzw. Recycling-Verfahren gefunden werden, stehen am Ende der Abfallhierarchie ressourceneffiziente Entsorgungswege im Fokus weiterer Untersuchungen. Ausgehend von der EU Deponierichtlinie (1999/31/EC, 2011), die in Österreich durch AWG (2002) und DVO (2008) umgesetzt wurde, werden Deponieklassen für gefährlichen und nicht gefährlichen Abfall definiert. Für Flugaschen aus der Abfallverbrennung ergeben sich nun zwei Möglichkeiten der Ablagerung auf einer Deponie:

1. Die Entsorgung als gefährlicher Abfall auf einer Deponie für gefährliche Abfälle.
2. Die Entsorgung auf einer Reststoffdeponie sofern die Nichtgefährlichkeit nachgewiesen, bzw. durch ein geeignetes Verfahren (z.B. Zementstabilisierung) hergestellt und anschließend nachgewiesen wird. Geeignete Verfahren wer-

den seit Jahrzehnten erforscht und teilweise auch in der Praxis angewendet (Chandler, et al., 1997). Sie können in separierende, stabilisierende und thermische Verfahren eingeteilt werden, wobei auch Kombinationen daraus möglich sind. Das oberste Ziel eines solchen Verfahrens muss es sein ein Produkt herzustellen, das den Kriterien der DVO 2008 und Festsetzungsverordnung bezüglich der Ausstufung zum Zweck der Deponierung genügt.

Derzeit werden die hier diskutierten Flugaschen FA 5 und FA 6 (Wirbelschichtverbrennung) nach einer Vermengung mit Wasser und (ausgestufteter, entmetallisierter) Schlacke auf einer Reststoffdeponie abgelagert. Wie bereits zuvor beschrieben, eignet sich die Flugasche FA 6 (Klärschlammverbrennung) zur Herstellung von phosphorbasiertem Düngemittel, was als Alternative zur Entsorgung angesehen werden kann, und wird daher in diesem Absatz nicht weiter diskutiert. Der Flugaschestrom FA 5 (Ersatzbrennstoff) kann unter den zuvor diskutierten Bedingungen weder vermieden noch stofflich verwertet werden. Da die Flugasche ohne aufwändiges Behandlungsverfahren auf einer Reststoffdeponie abgelagert werden kann, konnte im Zuge dieser Arbeit keine ressourcenschonende Alternative zur derzeitigen Praxis identifiziert werden.

Die Flugasche FA 7, die aus der Verbrennung gefährlicher Abfälle in einem Drehrohrofen stammt, wird ohne vorherige Behandlung auf einer Deponie für gefährliche Abfälle entsorgt. Da sich in Österreich keine derartigen Deponien befinden, muss die Asche ins Ausland verbracht werden, was mit entsprechenden Transportdistanzen und höheren Entsorgungskosten sowie dem Verbrauch von wertvollem untertägigem Deponieraum verbunden ist. Für Flugasche FA 7 besteht somit ein bedeutendes Potential zur Ressourcenschonung, sofern ein Behandlungsverfahren es ermöglicht, dass die dabei entstehenden Aschen schlussendlich obertägig auf Reststoffdeponien abgelagert werden können. Aus der chemischen Zusammensetzung der Flugasche FA 7 ergibt sich, dass dieses Behandlungsverfahren die Parameter Abdampfdruckstand, Pb, Zn und Cd im Eluat verbessern muss, um den Kriterien der DVO (2008), Abfallverzeichnisverordnung und der Festsetzungsverordnung bezüglich der Ausstufung zum Zweck der Deponierung zu genügen, wobei andere relevante Eigenschaften der Flugasche nicht negativ beeinflusst werden dürfen.

Die hier diskutierten Flugascheströme FA 1 bis FA 4, die aus der Rostfeuerung von vorwiegend Siedlungsabfällen und ähnlichen Abfällen stammen, werden derzeit auf einer Reststoffdeponie abgelagert, nachdem sie mit Zement stabilisiert wurden. Ähnlich dem Flugaschestrom FA 7 ergibt sich in diesem Fall eine potentielle Steigerung der Ressourceneffizienz durch ein alternatives Behandlungsverfahren, das auf den Einsatz von Zement verzichtet. In Tabelle 1 wird gezeigt, dass es Ziel eines solchen Verfahrens sein muss, je nach behandelte Flugasche, die Parameter Abdampfdruckstand, Pb im Eluat und/oder Hg-Gesamtgehalt zu senken. Auch hier dürfen keine anderen, relevanten Eigenschaften negativ beeinflusst werden.

## 4. Schlussfolgerung

Die Möglichkeiten von qualitativer Abfallvermeidung, Recycling und Beseitigung von 7 Flugascheströmen, die mehr als 35% der in Österreich vorhandenen Abfallverbrennungskapazität entsprechen und aus drei verschiedenen Ofentypen (Rostfeuerung, Wirbelschichtfeuerung und Drehrohrofen), in denen Siedlungsabfälle, Ersatzbrennstoffe, Klärschlamm oder gefährliche Abfälle verbrannt werden, stammen, wurden analysiert und in Hinblick auf die Möglichkeiten zur qualitativen Abfallvermeidung, Recycling und ressourcenschonenden Beseitigung untersucht.



Dabei hat sich gezeigt, dass durch das Trennen von Kessel- und Filterasche zwei Reststoffströme mit unterschiedlichem Schadstoffgehalt geschaffen werden können. Ein Flugaschestrom eignet sich für die Gewinnung von Phosphor-Dünger, während eine Verwertung in der Zementindustrie oder Rückgewinnung von Metallen nicht sinnvoll sind. Alternative Behandlungsverfahren für Flugasche im Rahmen der Beseitigung von Abfällen können zur Einsparung von Zement und zu einem verringerten Verbrauch der Ressource Deponievolumen (sowohl unter- als auch obertägig) führen.

Es konnte gezeigt werden, dass ein alternatives Konzept zum Flugaschenmanagement einen wesentlichen Beitrag zu einer nachhaltigen und ressourcenschonenden Abfallwirtschaft tätigen kann, insbesondere im Bereich der Behandlung von Flugaschen vor der Entsorgung auf einer Deponie. Weitere Untersuchungen sind jedoch notwendig um zu ermitteln, welche Behandlungsverfahren in Hinblick auf die spezifischen Eigenschaften jedes einzelnen Flugaschestroms am besten für eine Dekontamination geeignet sind.

### Danksagung

Die vorliegende Arbeit ist Teil einer groß angelegten Forschungsinitiative zu anthropogenen Ressourcen (Christian-Doppler-Labor für Anthropogene Ressourcen). Für die finanzielle Unterstützung dieser Forschungsinitiative wird dem österreichischen Bundesministerium für Wissenschaft, Forschung und Wirtschaft und der Nationalstiftung für Forschung, Technologie und Entwicklung sowie der Wien Energie GmbH und der Wiener Kommunal-Umweltschutzprojektgesellschaft mbH (WKU) gedankt. Darüber hinaus ergeht ein spezieller Dank an die Magistratsabteilung 48 der Stadt Wien, die über ihre Tochtergesellschaft WKU das Projekt nicht nur kofinanziert, sondern auch unverzichtbare Leistungen in Form von Anlagen und Personal für Versuche zur Verfügung stellt.

### Literaturverzeichnis

- [1] 1999/31/EC. (2011). Council directive 1999/31/CE of 26 April 1999 on the landfill of waste. *Official Journal of the European Communities L182/1*.
- [2] Abfallverzeichnisverordnung. (2003). AbfallverzeichnisVO (2003). Verordnung des Bundesministers für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft über ein Abfallverzeichnis (Abfallverzeichnisverordnung) StF: BGBl. II Nr. 570/2003.
- [3] Astrup, T. (2008). Management of APC residues from Waste to Energy Plants. *ISWA, Working Group on Thermal Treatment of Waste, Second Edition*.
- [4] AWG. (2002). Bundesgesetz über eine nachhaltige Abfallwirtschaft. *StF: BGBl. I Nr. 102/2002*.
- [5] Böhmer S., K. I. (2006). *Abfallverbrennung in Österreich, Statusbericht*. Wien: Umweltbundesamt GmbH.
- [6] BAWP. (2011). *Bundes-Abfallwirtschaftsplan*. Wien: Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft.
- [7] Born, M. (2005). *Dampfzeugerkorrosion*. SAXONIA.
- [8] BUWAL. (2005). *Richtlinie, entsorgung von abfällen in zementwerken, 2. Auflage*. Schweiz: Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL).
- [9] Chandler, A., Eighmy, T., Hartlen, J., Hjelmar, O., Kosson, D., Sawel, S., et al. (1997). *Studies in Environmental Science 67, Municipal Solid Waste Incinerator Residues, the international Ash Working Group*. Amsterdam – Lusanne – New York – Oxford – Shannon – Tokyo: Elsevier.
- [10] DüngemittelVO. (2004). Verordnung des Bundesministers für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, mit der Bestimmungen zur Durchführung des Düngemittelgesetzes 1994 erlassen werden. Österreich.
- [11] Duda, W. (1985). *cement data book, Internationale Verfahrenstechniken der*. Wiesbaden Berlin: Bauverlag GmbH.
- [12] DVO. (2008). Verordnung des Bundesministers für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft über Deponien, StF: BGBl. II Nr. 39/2008.
- [13] Egle, L., Rechberger, H., & M., Z. (2013). Vergleich von Verfahren zur Rückgewinnung von Phosphor aus Abwasser und Klärschlamm. *Österreichische Abfall und Wasserwirtschaft*, S. 66:30-39.
- [14] EN11885. (2009). Water Quality – Determination of selected elements by inductively coupled plasma optical emission spectrometry (ICP-OES) Issued 2009-11-01.
- [15] EN12457-4. (2003). Characterization of Waste – Leaching- Compliance test for leaching of granular waste materials and sludges – Part 4: One stage batch test at a liquid to solid ratio of 10 l/kg for materials with particle size below 10 mm without size reduction. 2003-01-01.
- [16] EN13657. (2012). Characterization of Waste – Digestion for subsequent determination of aqua regia soluble portion of elements. Issued 2012-12-01.
- [17] EN15216. (2008). Characterization of Waste – Determination of total dissolved solids (TDS) in water eluates. Issued 2008-01-01.
- [18] EN450-1. (2012). Flugasche für Beton, Definition, Anforderungen und Konformitätskriterien.
- [19] EU. (2008). RICHTLINIE 2008/98/EG des Europäischen Parlaments und des Rates über Abfälle.
- [20] Fellner J., L. J. (2014). Resource recovery from hazardous waste – the case of msw incineration fly ashes. *4th int. conference industrial and hazardous waste management*. Crete.
- [21] Festsetzungsverordnung. (1997). Verordnung des Bundesministers für Umwelt, Jugend und Familie über die Festsetzung von gefährlichen Abfällen und Problemstoffen (Festsetzungsverordnung gefährliche Abfälle) (CELEX-Nr.: 391L0689) StF: BGBl. II Nr.227/1997, Fassung vom 28.11.2012. Österreich.
- [22] GRAF-AG. (1998). Regelungen über die Abfallentsorgung in Zementwerken, Grundlagen, Methoden, Berechnungen. Schweizer Bundesamt für Umwelt, Wald und Landwirtschaft.
- [23] Hartmann, S., Koval, L., Skrobankova, H., Matysek, D., Winter, F., & Purgar, A. (2014). Possibilities of MSWI fly ash utilization. *9th Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems*.
- [24] Kalmykova, Y., & Karlfeldt, K. (2013). Phosphorus recovery from municipal solid waste incineration fly ash. *Waste Management 33/6*, S. 1403-1410.
- [25] Kleppmann, F. (2014). Current developments in European Waste-to-Energy. In T. S. Thome-Kozmiensky K., *Waste Management, Volume 4, Waste-to-Energy* (S. 49-55). Neuruppin.
- [26] Linz AG. (2014). Von [www.linzag.at](http://www.linzag.at) abgerufen
- [27] Nowak, B., Pessl, A., Aschenbrenner, P., Szentannai, P., Mattenberger, H., Rechberger, H., et al. (2012). Heavy metal removal from municipal solid waste fly ash by chlorination and thermal treatment. *Journal of Hazardous Materials (179,1-3)*, S. 323-331.
- [28] Purgar A., F. J. (2013). Effect of Combustion Technology and Waste on Fly. *ISWA World Congress*. Wien.
- [29] Purgar, A., Fellner, J., Lederer, J., Winter, F., Hartmann, S., Rechberger, H., et al. (2014). Mercury in Vienna's waste incineration cluster and related problems for fly ash disposal. 17-20 November 2014, Venice, Italy: Conference 5th international symposium on energy from biomass and waste.
- [30] Quina M., B. C. (2007). Treatment and use of air pollution control residues from MSW incineration: an overview. *WASTE MANAGEMENT*, S. 2097-2121.
- [31] Schlumberger, S., & Bühler, J. (2013). Metallrückgewinnung aus Filterstäuben der thermischen Abfallbehandlung nach dem FLUREC-Verfahren. In *Aschen - Schlacken - Stäube aus Abfallverbrennung und Metallurgie*. Neuruppin: TK Verlag.
- [32] Thome-Kozmiensky, K. (2013). *Aschen – Schlacken – Stäube aus Abfallverbrennung und Metallurgie*. Neuruppin: TK Verlag.
- [33] Thome-Kozmiensky, K. (2014). Verbrennung ist auch ein Verfahrensschritt in Recyclingprozessen. In *Strategie Planung Umweltrecht* (S. 31-45). Neuruppin, Deutschland.
- [34] WKO. (2013). *Erläuterungen zur abfallverzeichnisverordnung, festsetzungsverordnung gefährlicher abfälle und abfallnachweisverordnung 2003*. Von [www.wko.at](http://www.wko.at) abgerufen

Dipl.-Ing. Dr.techn. Amon Purgar\*  
amon.purgar@tuwien.ac.at

Dipl.-Ing. Florian Huber\*  
florian.huber@tuwien.ac.at

Dominik Blasenbauer\*, BSc  
dominik.blasenbauer@tuwien.ac.at

Ao.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Franz Winter\*\*  
franz.winter@tuwien.ac.at

\*Christian Doppler Labor für Anthropogene Ressourcen  
Technische Universität Wien, Karlsplatz 13/226, 1040 Wien

\*\*Institut für Verfahrenstechnik, Umwelttechnik  
und techn. Biowissenschaften  
Technische Universität Wien, Getreidemarkt 9/166, 1060 Wien