

25/2018

Blasenbauer, D.; Huber, F.; Fellner, J. (2018) „Alternative fly Ash Treatment Process: Combined Pelletisation Process and Thermal Treatment of Fly Ash from Waste Incineration Plants“, In: Mineralische Nebenprodukte und Abfälle 5, Thiel, St.; Thomé-Kozmiensky, E.; Friedrich, B.; Pretz, T.; Quicker, P.; Senk, D.S.; Wotruba, H. (Hrsg.), Thomeé-Kozmiensky Verlag GmbH, Neuruppin, p. 220-238, ISBN 978-3-944310-41-1

Alternative Fly Ash Treatment Process: Combined Pelletisation Process and Thermal Treatment of Fly Ash from Waste Incineration Plants

Dominik Blasenbauer, Florian Huber and Johann Fellner

At municipal solid waste incineration plants different solid residues (bottom ash, fly ash, filter cake) containing inorganic matter are generated. Approximately 2-4 wt.-% of the waste input is transferred into dust particles. This so-called fly ash is commonly declared as hazardous waste. However, if fly ash fulfils certain criteria, which includes the total and the eluate content of certain substances, it can be reclassified as non-hazardous waste.

In Austria, fly ash that fulfils these criteria is moistened with water and disposed of at non-hazardous waste landfills. Fly ash which cannot be reclassified as non-hazardous waste is either disposed of at landfills for hazardous waste or solidified and stabilised prior to a disposal at non-hazardous waste landfills. This work is focusing on fly ash that is not meeting the criteria for reclassification as non-hazardous waste.

Recent research has shown that only a few parameters prevent the reclassification of fly ash as non-hazardous waste. Even though, these pollutants are of minor concentrations, their water solubility may lead to concentrations that exceed the eluate limit values. Therefore, large amounts of fly ash need to be stabilised with cement or disposed of on a landfill for hazardous waste.

One option to remove relevant pollutants from fly ash is thermal treatment. Experiments in industrial scale were carried out to investigate the behaviour of fly ash during thermal co-treatment with combustible waste. Moisturised fly ash and combustible hazardous materials were fed into a rotary kiln. Results show that the majority of the fly ash (>90 wt.-%) was transferred into the bottom ash of the plant. Both the total and the eluate content of the bottom ash remained below limit values, thereby allowing its disposal at landfills for non-hazardous waste.

Problems occurred during the storage of moisturised fly ash in the waste bunker. The chemical composition of fly ash caused a hydration of CaO when mixed with water, which resulted in the formation of large lumps of fly ash. The latter were difficult to handle by the waste crane. In addition, a significant increase of the temperature in the waste bunker (even beyond the maximum temperature allowed) was observed due to the exothermic hydration reaction.

Pelletisation of fly ash prior to thermal treatment represents an option to avoid the observed problems. The defined spherical shape of the pellets prevents an uncontrolled agglomeration of fly ash in the waste bunker and limits the temperature increase. Hence, in the present paper a process that combines pelletisation and thermal treatment of fly ash as a cost efficient alternative to solidification/stabilisation treatment using cement is introduced.

Alternatives Flugaschebehandlungsverfahren: Kombinierte Pelletierung und thermische Behandlung von Flugaschen aus Abfallverbrennungsanlagen

Dominik Blasenbauer, Florian Huber und Johann Fellner

1.	Einleitung.....
1.1.	Flugasche – Definition und rechtliche Grundlagen
1.2.	Thermische Behandlung von Flugasche in separaten Anlagen
1.3.	Thermische Behandlung von Flugasche zusammen mit brennbaren Abfällen.....
1.4.	Pelletierung von Flugasche
1.5.	Neues Konzept – Kombinierte Pelletierung und thermische Behandlung von Flugasche
2.	Materialien und Methoden.....
2.1.	Pelletierung in Technikums-Maßstab
2.1.1.	Verwendete Flugaschen.....
2.1.2.	Technikums-Versuch.....
2.2.	Thermische Behandlung der Pellets
2.3.	Theoretische Überlegungen zu zukünftigen Entsorgungs- und Verwertungswegen.....
2.4.	Analysemethoden
3.	Ergebnisse und Diskussion
3.1.	Physikalische Eigenschaften der unpelletierten und pelletierten Flugasche.....
3.1.1.	Unpelletierte Flugasche.....
3.1.2.	Pelletierte Flugasche
3.2.	Chemische Analysen der unpelletierten und pelletierten Flugasche.....
3.3.	Chemische Analysen der Pellets nach der thermischen Behandlung.....
3.4.	Theoretische Überlegungen zu zukünftigen Entsorgungs- und Verwertungswegen.....
4.	Ausblick.....
5.	Literatur

Bei der thermischen Verwertung von Siedlungs- und Gewerbeabfällen entstehen die folgenden festen Rückstände: Schlacke, Flugasche und Filterkuchen. Etwa 2 bis 4 Ma.-% des Abfallinputs werden als staubförmige Partikel abgeschieden. Diese fallen als Flugasche an, welche zumeist als gefährlicher Abfall eingestuft ist. Erfüllt Flugasche jedoch bestimmte Kriterien, welche im Wesentlichen die Einhaltung von Grenzwerten des Gesamtgehalts und des Eluatgehalts betreffen, besteht die Möglichkeit einer Ausstufung als nicht-gefährlicher Abfall.

In Österreich können Flugaschen, welche diese Kriterien erfüllen, prinzipiell auf einer Reststoffdeponie abgelagert werden. Können Flugaschen nicht ausgestuft werden, werden diese entweder in einer Untertagedeponie abgelagert oder mit Zement stabilisiert und dann obertägig auf einer Reststoffdeponie abgelagert. In der vorliegenden Arbeit werden ausschließlich jene Flugascheströme betrachtet, welche einem Stabilisierungsprozess unterzogen werden oder unter Tage deponiert werden müssen.

Untersuchungen zeigen, dass nur einzelne Stoffe dafür verantwortlich sind, dass Flugaschen nicht ausgestuft werden können und deswegen stabilisiert oder unter Tage deponiert werden müssen. Diese Stoffe kommen zwar nur in relativ kleinen Massenkonzentrationen vor, bewirken aber durch ihre Löslichkeit Überschreitungen des Grenzwertes im Eluat.

Eine Möglichkeit, diese Stoffe abzutrennen, ist die thermische Behandlung von Flugaschen. Zu diesem Zweck wurden großtechnische Versuche durchgeführt, welche Aufschluss über das Verhalten von Flugasche bei der thermischen Mitbehandlung mit brennbaren Abfällen geben sollen. Dabei wurde einem Drehrohrofen ein Gemisch aus befeuchteter Flugasche und herkömmlichen Bunkermüll zugeführt. Die Ergebnisse der Versuche zeigen, dass der weitaus größte Teil (>90 Ma.-%) der Flugasche in die Abfallverbrennungsschlacke eingebunden wird. Sowohl die Gesamtgehalte, als auch die Eluatgehalte der entstandenen Schlacke entsprachen weiterhin den Kriterien für eine obertägige Deponierung.

Probleme traten allerdings bei der Lagerung der befeuchteten Flugasche auf. Aufgrund der chemischen Zusammensetzung kam es durch das Abmischen mit Wasser zu Abbindereaktionen, welche eine Klumpenbildung der befeuchteten Flugasche im Bunker zur Folge hatten. Die entstandenen Klumpen konnten nur unter großem mechanischem Kraftaufwand zerkleinert und aus dem Bunker entfernt werden. Zusätzlich kam es durch die Abbindereaktion im Abfallbunker zu einem signifikanten Temperaturanstieg, welcher die maximal erlaubte Temperatur überschritten hat.

Um diesen genannten Problemen entgegenzuwirken, kann Flugasche vor der thermischen Behandlung pelletiert werden. Durch die definierte Kugelform kann ein Zusammenklumpen der Flugasche und ein starker Temperaturanstieg verhindert werden. Die gegenständliche Arbeit beschreibt ein Verfahren, welches die Pelletierung von Flugasche mit einer thermischen Behandlung kombiniert und eine kostengünstige Alternative zum Stabilisationsprozess darstellen kann.

1. Einleitung

1.1. Flugasche – Definition und rechtliche Grundlagen

Bei der thermischen Verwertung von Siedlungs- und Gewerbeabfällen entstehen, bezogen auf den Abfallinput etwa 2 bis 4 Ma.-% staubförmige Rückstände, welche gemeinhin als Flugaschen bezeichnet werden [4]. Diese werden in den Kesselzügen und dem nachfolgenden Filtersystem, welches in Österreich als Gewebefilter oder elektrostatischer Abscheider ausgeführt ist, aus dem Abgas abgeschieden [4]. Die Kessel- und Filteraschen werden über Fördersysteme aus der Anlage ausgetragen und in Silos gelagert.

Flugaschen aus der Verbrennung von Abfällen können laut Abfallverzeichnisverordnung 2003 in jene eingeteilt werden, welche gefährliche Stoffe enthalten (Abfall Code 19 01 13 und 19 01 15) und in jene welche keine gefährlichen Stoffe enthalten (Abfall Code 19 01 14 und 19 01 16) [1]. Gefahrenrelevante Eigenschaften werden in [1] in Anlage 3 spezifiziert. Anlage 3 verlangt im Wesentlichen die Nicht-Erfüllung der Kriterien H1-H14 um als nicht-gefährlicher Abfall deklariert zu werden. Zusätzlich hat die EU-Kommission im Dezember 2014 die Verordnung EU 1357/2014 erlassen, in welcher sogenannte *hazardous properties* (HP)-Kriterien angeführt sind. Diese Kriterien HP1-HP15 dürfen ebenfalls nicht erfüllt sein, um einen Abfall als nicht-gefährlich einstufen zu können [12]. Können Flugaschen als nicht-gefährlicher Abfall klassifiziert werden, gibt es laut der österreichischen Deponieverordnung 2008 die Möglichkeit einer Ablagerung auf einer Reststoffdeponie, sofern die in Anhang 1, Tabellen 7 und 8 angeführten Grenzwerte eingehalten werden [2]. Ist eine Kennzeichnung als nicht-gefährlicher Abfall nicht möglich, so müssen Flugaschen auf einer Deponie für gefährliche Abfälle (untertägig) abgelagert werden oder nach einem Stabilisierungsprozess zum Zwecke der Deponierung (obertägig) ausgestuft werden, sofern auch hier die Grenzwerte der jeweiligen Deponieunterklasse und der sogenannten Eignungsprüfung eingehalten werden [2].

Die gängige Praxis in Österreich beim Umgang mit Flugaschen ist je nach Art der Flugasche unterschiedlich. Gefährliche Flugaschen werden in der Regel entweder unter Tage in Deutschland deponiert, oder dem Stabilisierungsprozess zugeführt und dann obertägig deponiert [4, 21]. Beim Stabilisierungsprozess wird der Flugasche zuerst Sand, der mineralische Anteil der Schlacke, Zement und Wasser beigegeben und härtet dann auf der Deponie zu einem festen (stabilisierten) Material aus [5]. Nicht-gefährliche Flugaschen können prinzipiell obertägig deponiert werden. Zur Unterdrückung von Staubemissionen werden diese Abfälle auch mit Wasser vermengt.

Untersuchungen haben gezeigt, dass Flugaschen aus Rostfeuerungsanlagen aufgrund der Kriterien H13 (*Stoffe und Zubereitungen, die nach einer Beseitigung auf irgendeine Art die Entstehung eines anderen Stoffes bewirken können, z.B. ein Auslaugprodukt, das eine der oben genannten Eigenschaften aufweist*) der Abfallverzeichnisverordnung 2003 und/oder HP10 (*reproduktionstoxisch*) der Verordnung EU 1357/2014 als gefährlich

einzustufen sind und daher nicht ohne Stabilisierung bzw. weiterer Behandlung obertägig deponiert werden können. Kriterium H13 enthält Grenzwerte für den Gesamt- und Eluatgehalt, welche zur Nicht-Erfüllung unterschritten werden müssen. HP10 enthält Gefahrenklasse- und Gefahrenkategorie-Code sowie die Codierung der Gefahrenhinweise für Abfallkomponenten und entsprechende Konzentrationsgrenzen für die Einstufung als gefährlicher Abfall.

Es hat sich weiter gezeigt, dass nur wenige Parameter, wie beispielsweise Blei im Eluat, dafür verantwortlich sind, dass Flugaschen aus Rostfeuerungsanlagen als gefährlich deklariert werden und daher stabilisiert oder unter Tage deponiert werden müssen. Die Schadstoffe kommen zwar nur in relativ geringen Konzentrationen vor, bewirken aber durch ihre Auslaugbarkeit in wässriger Umgebung Überschreitungen der Grenzwerte im Eluat. Daher müssen große Massen an Flugasche mit Zement stabilisiert oder unter Tage deponiert werden.

1.2. Thermische Behandlung von Flugasche in separaten Anlagen

Eine Möglichkeit zur Abtrennung von Schadstoffen aus der Flugasche stellt die thermische Behandlung dar. In [5] wurden bereits Ende der 1990er Jahre verschiedene Prozesse zur thermischen Behandlung von Flugasche aus der Abfallverbrennung beschrieben. Ziele der dort beschriebenen Verfahren sind im Wesentlichen eine Volumenreduktion, die Senkung der Löslichkeit von beteiligten Komponenten und das Erreichen eines Endprodukts, welches für eine Verwertung geeignet ist. Das zentrale Element all dieser Prozesse stellt eine Art (Schmelz-)Ofen dar, in welchem die Flugasche entweder vollständig aufgeschmolzen oder gesintert wird. Unterschiede ergeben sich hauptsächlich in der Vor- und Nachbehandlung der Edukte respektive der entstehenden Produkte. Ein ähnliches Konzept verfolgt [19] mit dem MR-Prozess. Dabei wird Flugasche zuerst in einem Extraktionsschritt nasschemisch behandelt und dann in einem Drehrohrofen bei 600 °C thermisch behandelt. Ziel der thermischen Behandlung sind die Zerstörung von Dioxinen und Furanen und der Transfer von Quecksilber in die Gasphase um es in einem nachgeschalteten Abgasreinigungsschritt abzuscheiden.

Die angeführten Verfahren finden alle in separaten Anlagen bzw. Anlagenteilen einer Abfallverbrennungsanlage statt und sind teilweise durch den sehr hohen Energieverbrauch während des Aufschmelzens und durch eigene nachgeschaltete Abgasreinigungssystemen gekennzeichnet.

1.3. Thermische Behandlung von Flugasche zusammen mit brennbaren Abfällen

In einem Versuch, welcher unter anderem in [16] und [17] vorgestellt wird, wurde im industriellen Maßstab untersucht, wie sich Abfallverbrennungsflugasche bei der Behandlung zusammen mit brennbaren Abfällen verhält. Die verwendete Flugasche stammte aus zwei Abfallverbrennungsanlagen mit Rostfeuerung, welche hauptsächlich Siedlungs- und siedlungsähnliche Gewerbeabfälle verbrennen. Die thermische

Behandlung fand in einer dritten Anlage statt, welche mit zwei Drehrohrlinien ausgestattet ist. Der Versuch wurde in einem der beiden Drehrohre durchgeführt um das zweite Drehrohr zu Referenzzwecken heranziehen zu können.

Vor der thermischen Behandlung wurde die Flugasche mit Wasser gemischt um einerseits Staubemissionen während des Transports und Handlings zu vermeiden und andererseits um den Einbindegrad in die Schlacke zu erhöhen.

Der Versuch der thermischen Mitbehandlung von befeuchteter Flugasche zeigte, dass die Flugasche zu mehr als 90 Ma.-% in die Drehrohrschlacke eingebunden wird. Durch Probenahme und Analyse der Schlacke konnte des Weiteren festgestellt werden, dass die thermische Behandlung von Flugasche zusammen mit brennbaren Abfällen keine negativen Auswirkungen auf den Gesamt- und den Eluatgehalt der Schlacke hat. Somit kann die Schlacke weiterhin obertägig auf einer Reststoffdeponie abgelagert werden.

Der Versuch unterstreicht das Potential, das in der thermischen Mitbehandlung von Flugasche liegt, zeigt aber gleichzeitig Herausforderungen in der Handhabung der Flugasche auf. So kam es bei der Lagerung der feuchten Flugasche im Bunker zu Problemen. Durch das Abmischen mit Wasser und aufgrund der chemischen Zusammensetzung der Flugasche, ist es zu einer Abbindereaktion gekommen, welche eine Klumpenbildung der befeuchteten Flugasche zur Folge hatte. Diese Klumpenbildung fand im unteren Bereich des Abfallbunkers statt, in welchem die Hydratationswärme nicht entweichen konnte und sich somit ein Brocken ausbildete, welcher nur unter größerem mechanischen Aufwand zerkleinert werden konnte. Eine weitere Problematik, verursacht durch die Abbindereaktion, war ein starker Temperaturanstieg im Abfallbunker.

Als mögliche Lösung für die genannten Probleme (Klumpenbildung und Temperaturanstieg im Abfallbunker) wird daher eine kombinierte Pelletierung und thermische Behandlung von Flugasche aus Abfallverbrennungsanlagen angedacht und im Folgenden (Kapitel 1.5.) näher vorgestellt.

1.4. Pelletierung von Flugasche

Unter der Pelletierung oder genauer der Aufbauagglomeration eines meist feinen Gutes versteht man zumeist die Erzeugung von sphärischen Teilchen mit definierter Korngröße in einem Pelletierteller oder einer -trommel. Die Pelletbildung erfolgt durch Rollen des feuchten Gutes im Apparat, in welchem die anfangs kleinen Teilchen durch Haftkräfte zu größeren Agglomeraten heranwachsen. Neben der Prozessführung, wie beispielsweise der Änderung der Neigung und Drehzahl des Tellers oder der Trommel, sind auch die Eigenschaften des Aufgabematerials wie etwa die Partikeldurchmesser, die Benetzbarkeit und die chemische Zusammensetzung von großer Bedeutung. So sollten in etwa 50 % der zu agglomerierenden Teilchen eine Partikelgröße kleiner 200 µm aufweisen um Pellets mit ausreichender Druckfestigkeit zu erzeugen [15]. Die Festigkeit der frischen, sogenannten *grünen Pellets* ist für die weitere Handhabung wichtig, da diese zumeist über diverse Fördersysteme transportiert werden und dabei nicht zerfallen sollen.

Pelletierung von Flugasche wird in [5], [6] und [20] beschrieben. In [5] wird das feine Material mit Lehm vermischt, pelletiert und anschließend in einem eigenen Drehrohrföfen bei knapp 1.000 °C gesintert. Der Pelletierprozess wie in [6] beschrieben hat zum Ziel, die produzierten Pellets in der Bauindustrie zu verwenden. Es wird dabei auf eine anschließende thermische Behandlung verzichtet. Stattdessen handelt es sich dabei um einen zweistufigen Pelletierprozess mit voranstehender Flugaschewäsche. Die Flugaschewäsche hat zum Zweck, Chlorid- und Sulfatkonzentrationen zu reduzieren. Im ersten Pelletierschritt wird die gewaschene Flugasche aus einer Rostfeuerung oder einem Drehrohrföfen zusammen mit Flugasche aus einer Kohlefeuerung, sowie mit Kalk, Zement und Wasser pelletiert. Diese Pellets werden in einem zweiten Pelletierschritt ein weiteres Mal mit Zement und Wasser gemischt und so eine harte Schale um die Pellets erzeugt. Diese harte Schale soll einerseits die Festigkeit steigern und andererseits das Auslaugverhalten verbessern. Bei dem in [20] beschriebenen Prozess werden Agglomerate aus Abfallverbrennungsflugasche und Klärschlamm hergestellt und anschließend gebrannt. Ziel dieser Studie war es, das Auslaugverhalten von Schwermetallen aus diesen gebrannten Pellets auf einer Deponie zu untersuchen. Es hat sich gezeigt, dass bei einer Brenntemperatur von 1.100 °C, einer Verweilzeit von acht Minuten im Ofen und einem Verhältnis von einem Teil Abfallverbrennungsflugasche zu vier Teilen Klärschlamm, die niedrigste Eluatkonzentration von Schwermetallen auftritt.

1.5. Neues Konzept – Kombinierte Pelletierung und thermische Behandlung von Flugasche

Dieses Konzept sieht vor, vor der thermischen Behandlung von Flugasche zusammen mit brennbaren Abfällen, diese durch Aufbauagglomeration in eine definierte Partikelform zu bringen. Die definierte Form soll gewährleisten, dass der Abbindevorgang innerhalb einzelner Pellets stattfindet und somit eine unkontrollierte Klumpenbildung verhindert wird. Die Hydratationswärme soll in der Pelletschüttung besser als in der Schüttung aus befeuchteter Flugasche abgeführt werden, sodass die maximale Lagertemperatur im Abfallbunker nicht überschritten wird.

Die in einem Silo gelagerte Flugasche wird gemeinsam mit Wasser als Bindemittel auf den Pelletierteller aufgegeben. Die grünen Pellets fallen in eine Containermulde, mit welcher sie zum Bunker transportiert und dort abgeladen werden. Von hier werden sie gemeinsam mit anderen brennbaren Abfällen der Feuerung zugeführt. Durch die Hitze kommt es zu Sintervorgängen, welche die Festigkeit der Pellets zusätzlich erhöht; flüchtige Bestandteile gehen ins Abgas über. Die gesinterten Pellets werden in die Abfallverbrennungsschlacke eingebunden.

2. Materialien und Methoden

2.1. Pelletierung in Technikums-Maßstab

2.1.1. Verwendete Flugaschen

Die für die Pelletierung verwendeten Flugaschen stammen aus Rostfeuerungsanlagen, welche Siedlungs- und siedlungsähnliche Gewerbeabfälle verbrennen. Die Flugaschen sind eine Mischung aus Kessel- und Filteraschen in dem Verhältnis, indem

diese beiden Rückstände anfallen. In Abschnitt 3.2. ist die chemische Zusammensetzung der verwendeten Flugaschen angeführt.

2.1.2. Technikums-Versuch

Die Pelletierung der Flugasche wurde in wissenschaftlichen Versuchen durchgeführt. Die Pelletieranlage besteht aus den Hauptkomponenten Pelletierteller, Bindemittel-Dosierstation und Vorlagebehälter für das Aufgabematerial. Bild 1 zeigt ein vereinfachtes Fließschema der Pelletieranlage. Die Flugasche wurde von einem Vorlagebehälter mittels Dosierschnecke in einen Pflugscharmischer transportiert und dort mit Wasser vorgemischt. Die befeuchtete Flugasche wurde im nächsten Schritt auf den sich drehenden Pelletierteller dosiert, auf welchem die Aufbauagglomeration stattfindet. Durch Änderung der Neigung und Drehzahl des Tellers konnte die Größe der erzeugten Pellets so beeinflusst werden, dass sie ab einer bestimmten Masse durch die Fliehkraft aus dem Teller ausgetragen und in einem Container aufgefangen wurden.

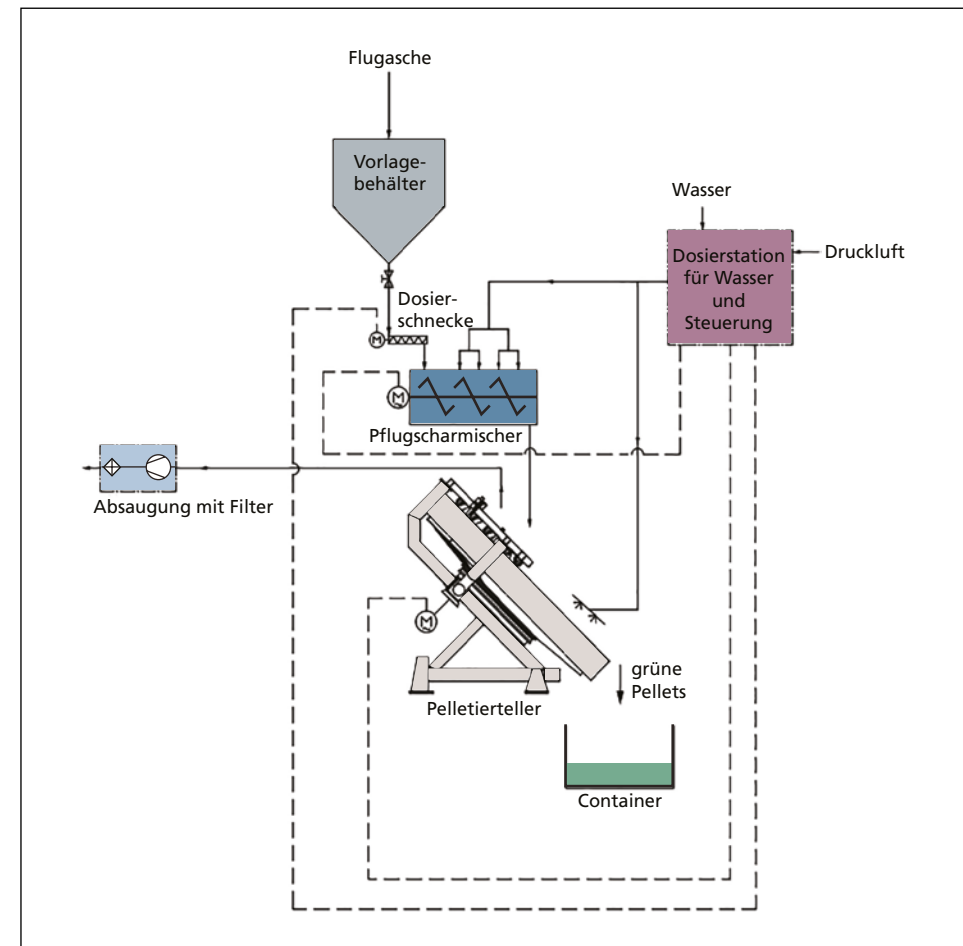


Bild 1: Schema des Versuchs zur Pelletierung von Flugasche

Auf diese Weise konnten bei einem Massenstrom von 300 kg/h zirka 600 kg grüne Pellets, mit einem Wassergehalt von 15 Ma.-% hergestellt werden. Etwa 400 kg wurden in Big Bags für weitere Versuche verpackt. Die Zielgröße der Pellets betrug etwa 8 mm (Bild 2), weil der Eluattest nach EN 12457/4 für Korngrößen kleiner 10 mm definiert ist [8]. Wären die Pellets wesentlich kleiner als 8 mm, so wäre die Oberfläche der Pellets in der Schüttung größer, was wiederum die Stoffaustauschfläche bei einem Eluattest auch erhöhen würde und somit negative Auswirkungen auf die Eluatgehalte haben kann.



Bild 2: Erzeugte Pellets mit Maßstab; Zielgröße etwa 8 mm

2.2. Thermische Behandlung der Pellets

Um das Verhalten und die Auswirkungen einer thermischen Behandlung auf die Flugaschepellets zu untersuchen, wurden diese in einem Labor-Drehrohrofen bei verschiedenen Temperaturen thermisch behandelt. Versuchsaufbau und -durchführung wurden von den Autoren der vorliegenden Arbeit bereits in [18] eingehend beschrieben.

2.3. Theoretische Überlegungen zu zukünftigen Entsorgungs- und Verwertungswegen

Behandelt man Flugasche nach oben vorgestelltem Konzept im industriellen Maßstab, so muss bedacht werden, welche Konsequenzen dies für künftige Entsorgungswege haben kann. Zusätzlich kann in die Überlegung mit einfließen, ob man durch die kombinierte Pelletierung und thermische Behandlung der Flugasche potentielle Verwertungswege von Schlacke erschwert oder verhindert werden.

Basierend auf den Ergebnissen der thermischen Behandlung der Pellets kann eine fiktive Schlacke hergestellt werden und verglichen werden, für welche Entsorgungs- und Verwertungswege diese in Frage kommt. Dazu werden die chemische Zusammensetzung der Schlacke einer Rostfeuerung (Tabelle 1) und die chemische Zusammensetzung der Flugaschepellets nach einer thermischen Behandlung bei 950 °C (Tabelle 5 – Spalte 3) miteinander kombiniert.

Beim Vergleich von verschiedenen Entsorgungs- und Verwertungswegen werden die Deponierung auf einer Reststoffdeponie in Österreich und die Verwertungsmöglichkeiten in Österreich gegenübergestellt. Es können dabei sinnvollerweise nur die Gesamtgehalte verglichen und berechnet werden, da eine Abschätzung des Eluationsverhaltens einer Mischung nicht möglich ist.

Tabelle 1: Gesamtgehalte anorganischer und organischer Bestandteile von Schlacke einer MVA mit Rostfeuerung

Parameter		Schlacke aus MVA mit Rostfeuerung
		mg/kg TM*
		Gesamtgehalte
Silber	Ag	26
Arsen	As	6,4
Barium	Ba	1.530
Cadmium	Cd	61
Cobalt	Co	46
Chrom	Cr	320
Kupfer	Cu	5.300
Eisen	Fe	43.900
Quecksilber	Hg	0,101
Molybdän	Mo	12
Nickel	Ni	150
Blei	Pb	1.210
Antimon	Sb	71
Zinn	Sn	180
Zink	Zn	2.620
		Organische Summenparameter
		%
TOC		0,91
Glühverlust (550 °C)		2,8
KW Index		71

TM: Trockenmasse; TOC: total organic carbon; KW: Kohlenwasserstoff; *ausgenommen TOC und Glühverlust

Die Entsorgung auf einer Reststoffdeponie ist in Österreich durch die Deponieverordnung 2008 geregelt und bedingt als ersten Schritt, dass es sich beim betrachteten Abfallstrom um einen nicht-gefährlichen Abfall handelt (vgl. Abschnitt 1.1.). Werden des Weiteren noch die Grenzwerte der Deponieverordnung 2008 für eine Ablagerung auf einer Reststoffdeponie eingehalten, so kann der Abfallstrom dort eingebaut werden. Die Verwertung von Schlacken aus der Abfallverbrennung wird in Österreich nicht durchgeführt und es ist auch vom Gesetzgeber aufgrund des Vorsorgeprinzips (keine Verteilung von Schadstoffen) erwünscht, diese zu deponieren [21]. Es gibt jedoch im österreichischen Bundesabfallwirtschaftsplan 2017 – Teil 1 Grenzwerte, welche bei Einhaltung eine Verwendung von Schlacken aus der Abfallverbrennung in der Tragschicht von Straßen – unter bestimmten Bedingungen – erlauben [3]. Die Grenzwerte sind in der Tabelle 6 angeführt.

Der Berechnung der Konzentration in der fiktiven Schlacke liegt die Annahme zu Grunde, dass bei der Abfallverbrennung etwa 20 Ma.-% Schlacke und 3 Ma.-% Flugasche als Verbrennungsrückstände entstehen. Bei den Technikums-Versuchen im Drehrohr hat sich herausgestellt, dass ein geringer flüchtiger Anteil der Input-Masse an Pellets in sogenannte sekundäre Flugasche übergeht [18]. Die Bildung dieser sekundären Flugasche wird bei der Überlegung zu möglichen Entsorgungs- und Verwertungswegen vernachlässigt und es wird angenommen, dass die gesamte Flugasche in die Schlacke eingebunden wird.

2.4. Analysemethoden

Wie in Abschnitt 1.4. beschrieben, ist die Partikelgröße ein (mit-)entscheidender Parameter für die Pelletierung eines Guts mittels Aufbauagglomeration. Aus diesem Grund wird vor der Pelletierung eine Partikelgrößenanalyse der Flugasche mittels Laserbeugungs-Partikelgrößenmessgerät (Mastersizer 2000) durchgeführt.

Für die hergestellten (grünen) Pellets sind vor allem verschiedene, die Festigkeit betreffende Eigenschaften von Bedeutung, da die Pellets bei nachfolgenden Förder- und Transportvorgängen bis zur thermischen Behandlung nicht brechen sollen.

Eine bei der Pelletierung übliche Kenngröße ist die sogenannte Drop Number, welche mittels Fall-Test erhalten wird. Dazu wird eine bestimmte Anzahl an grünen Pellets herangezogen und von einer definierten Höhe auf eine harte Oberfläche fallen gelassen. Es wird die Anzahl an Stürzen festgehalten, bis das Pellet bricht. Die Drop Number erhält man durch aufsummieren der einzelnen Stürze, dividiert durch die Anzahl der untersuchten Pellets. Hierzu wurden zehn Pellets aus einer Höhe von einem Meter auf eine harte Betonfläche fallengelassen.

Es wurde eine Siebanalyse mit den Maschenweiten 7,1 mm, 8 mm und 10 mm durchgeführt, um die Partikelgrößenverteilung der Pellets zu bestimmen.

Um zu untersuchen, ob die Pellets bei der Lagerung zusammenkleben, wurden mehrere 100 L Big Bags mit grünen Pellets befüllt, übereinander gestapelt und mehrere Monate gelagert. Zur Abschätzung, welches Volumen die Pellets bei Lagerung einnehmen, wurde eine Schüttdichtemessung nach Böhme (EN 459) durchgeführt [11]. Für die Druckfestigkeitsprüfung wurden 30 Pellets (Grenzkorn des 8 mm-Siebs, nach der Lagerung) einzeln auf eine Platte mit Drucksensor (Portable Precision USB Sensor Interface 9205) gegeben, welche auf einer hydraulischen Presse montiert ist. Der Druck, welcher notwendig ist um ein Pellet zu brechen, wurde von der Software DigiView V2012.2.1 aufgezeichnet.

Um den Einfluss der thermischen Behandlung auf die chemische Zusammensetzung zu untersuchen, wurden sowohl vor, als auch nach der thermischen Behandlung die Gesamt- und Eluatgehalte gemessen. Für die Gesamtgehalt-Analysen wurden die Proben zuerst nach EN 13657 mittels Königswasser aufgeschlossen und anschließend nach EN 11885 mittels ICP-OES (Jobin Yvon Ultima 2) gemessen [7, 9]. Die Eluate wurden nach EN 12457/4 hergestellt und danach ebenfalls nach EN 11885, mittels ICP-OES gemessen [8, 9]. Die Abdampfrückstände wurden nach EN 15216 bestimmt [10].

3. Ergebnisse und Diskussion

3.1. Physikalische Eigenschaften der unpelletierten und pelletierten Flugasche

3.1.1. Unpelletierte Flugasche

Tabelle 2 zeigt die partikelbeschreibenden Eigenschaften der unpelletierten Flugasche. Als Verteilungsart wurde dabei die volumetrische Verteilung gewählt. Diese gibt die Verteilung der Masse auf die Partikeldurchmesser an. Die Indizes bei den in Tabelle 2 angegebenen Partikeldurchmesser D_{10} , D_{50} und D_{90} geben an, welcher Prozentsatz an Partikeln kleiner als der angegebene Wert ist. Beispielsweise ist $D_{50} = 24 \mu\text{m}$ so zu interpretieren, dass 50 Ma.-% des Teilchenkollektivs kleiner als $24 \mu\text{m}$ vorliegen. Die Partikelgrößenverteilung legt nahe, dass sich die Flugasche sehr gut für die Aufbauagglomeration eignet. Die spezifische Oberfläche der verwendeten Flugasche beträgt $1,7 \text{ g/m}^2$.

Tabelle 2: Partikelbeschreibende Eigenschaften der unpelletierten Flugasche; D_{10} , D_{50} und D_{90} stehen für Partikel, die kleiner als der angegebene Wert sind; Beispiel: D_{10} gibt an, dass 10 Ma.-% der Partikel kleiner als $1,172 \mu\text{m}$ sind

Verteilungsart	Spezifische Oberfläche	D_{10}	D_{50}	D_{90}
	g/m^2	μm		
Volumetrisch	1,7	1	24	261

3.1.2. Pelletierte Flugasche

Die Drop Number beträgt für die grünen Pellets im Mittel 10 mit einer Standardabweichung von 3 aus einer Fallhöhe von 1 m. Im Vergleich zu [14] und [13] ist dieser Wert hoch, da in den genannten Studien die grünen Pellets aus Höhen von nur etwa 0,5 m fallengelassen wurden.

Das Ergebnis der Siebanalyse ist in Tabelle 3 dargestellt. Mehr als die Hälfte der produzierten Pellets erreichten die angestrebte Zielgröße von 8–10 mm. Nur ein kleiner Anteil von 4,5 Ma.-% ist größer als 10 mm.

Weiters wurden der Wassergehalt der grünen Pellets (15 Ma.-%) und die Schüttdichte ($1,043 \text{ kg/dm}^3$) bestimmt (Tabelle 3). Das Ergebnis der Druckfestigkeitsprüfung ergab einen Mittelwert von 131 N mit Standardabweichung von 36 N. Die in Säcken gelagerten Pellets klebten zwar teilweise aneinander, diese konnten jedoch ohne merklichen Kraftaufwand mit den Fingern voneinander gelöst werden. Die Temperaturentwicklung in der Pelletschüttung war deutlich niedriger als in der Schüttung aus befeuchteter Flugasche.

Tabelle 3: Physikalische Eigenschaften der grünen und gelagerten Pellets

		Siebanalyse			
Durchmesser	mm	< 7,1	7,1 – 8	8 – 10	> 10
Massenanteil	%	17,2	21,9	56,4	4,5
Grüne Pellets					Gelagerte Pellets
Wassergehalt		Drop Number		Schüttdichte	Druckfestigkeit
	Ma.-%			kg/dm^3	N
	15	10 (3)		1,043	131 (36)

Standardabweichung in Klammern

3.2. Chemische Analysen der unpelletierten und pelletierten Flugasche

In Tabelle 4 sind die Ergebnisse der chemischen Analysen der Gesamt- und Eluatgehalte der Flugaschen vor und nach der Pelletierung gegenübergestellt und mit den Grenzwerten der Abfallverzeichnisverordnung 2003, der Verordnung EU 1357/2014 und der Deponieverordnung 2008 verglichen [1, 2, 12].

Tabelle 4: Gesamt- und Eluatgehalte der unpelletierten und pelletierten Flugasche und Grenzwerte laut Abfallverzeichnisverordnung 2003, EU1357/2014 und Deponieverordnung 2008

Parameter		Unpelletierte Flugasche	Pelletierte Flugasche	Grenzwerte lt. Abfallverzeichnisverordnung 2003 und (EU 1357/2014)	Grenzwerte lt. Deponieverordnung 2008
				mg/kg TM*	
Silber	Ag	23 (1,4)	22 (1,4)	–	–
Arsen	As	< 3,6 (–)	< 3,6 (–)	1.000	5.000
Barium	Ba	1.200 (27)	1.100 (28)	–	–
Cadmium	Cd	190 (3)	180 (16)	1.000	5.000
Cobalt	Co	31 (6)	30 (6)	–	–
Chrom	Cr	300 (21)	270 (22)	–	–
Kupfer	Cu	1.100 (60)	1.000 (30)	–	–
Eisen	Fe	13.000 (430)	13.000 (630)	–	–
Quecksilber	Hg	14 (1)	15 (1)	20	20
Molybdän	Mo	12 (1)	11 (1)	–	–
Nickel	Ni	55 (23)	45 (9)	–	–
Blei	Pb	2.200 (45)	2.100 (100)	(3.000)	–
Antimon	Sb	680 (29)	680 (17)	–	–
Selen	Se	< 0,48 (–)	4,8 (0,9)	–	–
Zinn	Sn	400 (18)	400 (14)	–	–
Zink	Zn	14.000 (200)	13.000 (900)	–	–
Eluatgehalte					
pH-Wert		10,5 (0,4)	10,9 (0,1)	6–13	6–13
Abdampfrückstand		230.000 (32.000)	170.000 (5.800)	–	60.000
Silber	Ag	< 0,03 (–)	< 0,03 (–)	50	1
Arsen	As	< 0,18 (–)	< 0,18 (–)	25	2
Barium	Ba	2,4 (0,1)	1,7 (0,1)	300	100
Cadmium	Cd	< 0,018 (–)	< 0,018 (–)	5	1
Cobalt	Co	< 0,09 (–)	< 0,09 (–)	100	5
Chrom	Cr	1,3 (0,1)	5,0 (0,4)	70	10
Kupfer	Cu	< 0,03 (–)	< 0,03 (–)	100	50
Quecksilber	Hg	0,092 (0,004)	0,075 (0,006)	0,5	0,1
Molybdän	Mo	3,4 (0,1)	2,8 (0,2)	30	10
Nickel	Ni	< 0,033 (–)	< 0,033 (–)	40	10
Blei	Pb	42 (6)	0,78 (0,31)	50	10
Antimon	Sb	< 0,18 (–)	< 0,18 (–)	5	5
Selen	Se	0,49 (0,13)	0,49 (0,11)	7	0,5
Zinn	Sn	< 0,123 (–)	< 0,123 (–)	1.000	20
Zink	Zn	18 (1)	8,9 (3,0)	100	50

* ausgenommen pH-Wert | TM: Trockenmasse | Standardabweichungen in Klammern; Werte bei welchen < voransteht, zeigen die Nachweisgrenze für dieses Element an.

Quellen:

BMLFUW: Verordnung des Bundesministers für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft über ein Abfallverzeichnis (Abfallverzeichnisverordnung). In: U.u.W. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft (Hrsg.), 2003

BMLFUW: Verordnung des Bundesministers für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft über Deponien (DVO 2008). In: U.u.W. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft (Hrsg.), 2008

Europäische Kommission: Verordnung (EU) Nr. 1357/2014 der Kommission vom 18. Dezember 2014 zur Ersetzung von Anhang III der Richtlinie 2008/98/EG des Europäischen Parlaments und des Rates über Abfälle und zur Aufhebung bestimmter Richtlinien. In: Europäische Kommission (Hrsg.), Brüssel, 2014

Die Pelletierung hat auf den Gesamtgehalt der analysierten Stoffe erwartungsgemäß keinen entscheidenden Einfluss, da beim Pelletierprozess lediglich Wasser als Bindemittel zugegeben und dieser bei Raumtemperatur durchgeführt wird. Bei Betrachtung der grenzwertrelevanten Parameter As-, Cd-, Hg- und Pb-Gesamtgehalt liegen alle unter den gesetzlich vorgeschriebenen Grenzwerten. Jedoch unterschreiten die Gesamtgehalte von Hg und Pb die Grenzwerte nicht substantiell, sodass es durch etwaige Spitzen zu Überschreitungen kommen kann. Der Anstieg an Se nach der Pelletierung wird als Messfehler interpretiert.

Bei den Eluatgehalten lassen sich zum Teil signifikantere Unterschiede vor und nach der Pelletierung erkennen. Der Abdampfrückstand der pelletierten Flugasche ist niedriger, wobei dieser auch nach der Pelletierung den Grenzwert der Deponieverordnung 2008 (60.000 mg/kg TM) übersteigt. Die Löslichkeit der Elemente Ba, Hg, Mo, Pb und Zn wird ebenfalls gesenkt. Dies ist bei Pb so stark ausgeprägt (von 42 mg/kg TM zu 0,78 mg/kg TM), dass nach der Pelletierung der Pb-Eluatgehalt unter dem von der Deponieverordnung 2008 vorgeschriebenen Grenzwert von 10 mg/kg TM liegt. Für Cr kann ein Anstieg der Löslichkeit festgestellt werden.

3.3. Chemische Analysen der Pellets nach der thermischen Behandlung

Wie in [18] detailliert ausgeführt hat sich herausgestellt, dass die Behandlungsdauer kaum Einfluss auf die chemische Zusammensetzung der Pellets nach der thermischen Behandlung nimmt. Daher wurden bei den jeweiligen Temperaturabschnitten Mittelwerte der verschiedenen Versuchsdurchführungen gebildet und die Standardabweichungen berechnet. Die Ergebnisse für die Temperaturen 450 °C und 950 °C sind in Tabelle 5 angeführt. Dort werden die Konzentrationen von Gesamt- und Eluatgehalt nach der thermischen Behandlung, den jeweiligen Grenzwerten der Abfallverzeichnisverordnung 2003, der Verordnung EU 1357/2014 und der Deponieverordnung 2008 gegenübergestellt [1, 2, 12].

Tabelle 5: Gesamt- und Eluatgehalte der thermisch behandelten Flugaschepellets bei 450 und 950 °C und Grenzwerte lt. Abfallverzeichnisverordnung 2003, EU1357/2014 und Deponieverordnung 2008

Parameter		Thermische Behandlung bei 450 °C	Thermische Behandlung bei 950 °C	Grenzwerte lt. Abfallverzeichnisverordnung 2003 und (EU 1357/2014)	Grenzwerte lt. Deponieverordnung 2008
		mg/kg TM*			
Silber	Ag	24 (2)	22 (4)	–	–
Arsen	As	< 3,6 (–)	<3,6 (–)	1.000	5.000
Barium	Ba	1.200 (19)	1.300 (98)	–	–
Cadmium	Cd	180 (3030)	56 (18)	1.000	5.000
Cobalt	Co	29 (7)	47 (3)	–	–
Chrom	Cr	640 (490)	1.800 (1.000)	–	–
Kupfer	Cu	1.200 (120)	900 (150)	–	–
Eisen	Fe	14.000 (1.100)	14.000 (250)	–	–
Quecksilber	Hg	0,70 (0,95)	0,23 (0,34)	20	20

Tabelle 5: Gesamt- und Eluatgehalte der thermisch behandelten Flugaschepellets bei 450 und 950 °C und Grenzwerte lt. Abfallverzeichnisverordnung 2003, EU1357/2014 und Deponieverordnung 2008 – Fortsetzung –

Parameter		Thermische Behandlung bei 450 °C	Thermische Behandlung bei 950 °C	Grenzwerte lt. Abfallverzeichnisverordnung 2003 und (EU 1357/2014)	Grenzwerte lt. Deponieverordnung 2008
		mg/kg TM*			
Gesamtgehalte					
Molybdän	Mo	14 (6)	12 (1)	–	–
Nickel	Ni	5.040 (–)	240 (200)	–	–
Blei	Pb	2.200 (130)	350(540)	(3.000)	–
Antimon	Sb	7.720(50)	870 (80)	–	–
Selen	Se	1,9 (2,3)	< 0,48 (–)	–	–
Zinn	Sn	440 (27)	580 (56)	–	–
Zink	Zn	14.000 (410)	13.000 (1.500)	–	–
Eluatgehalte					
pH-Wert		10,8	10,1	6–13	6–13
Abdampfrückstand		190.000	200.000	–	60.000
Silber	Ag	< 0,03 (–)	< 0,03(–)	50	1
Arsen	As	< 0,18 (–)	< 0,18 (–)	25	2
Barium	Ba	2,1 (0,2)	1,0 (0,1)	300	100
Cadmium	Cd	< 0,018 (–)	< 0,018 (–)	5	1
Cobalt	Co	< 0,09 (–)	< 0,09 (–)	100	5
Chrom	Cr	39 (15)	490 (155)	70	10
Kupfer	Cu	< 0,03 (–)	< 0,03 (–)	100	50
Quecksilber	Hg	< 0,057 (–)	< 0,057 (–)	0,5	0,1
Molybdän	Mo	4 (1)	12 (1)	30	10
Nickel	Ni	< 0,033 (–)	< 0,033 (–)	40	10
Blei	Pb	< 0,36 (–)	< 0,36 (–)	50	10
Antimon	Sb	< 0,18 (–)	< 0,18 (–)	5	5
Selen	Se	0,5 (0,2)	2,2 (0,3)	7	0,5
Zinn	Sn	< 0,123 (–)	< 0,123 (–)	1.000	20
Zink	Zn	2,9 (1,9)	0,68 (0,04)	100	50

* ausgenommen pH-Wert | TM: Trockenmasse | Standardabweichungen in Klammern; Werte bei welchen < voransteht, zeigen die Nachweisgrenze für dieses Element an

Quellen:

BMLFUW: Verordnung des Bundesministers für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft über ein Abfallverzeichnis (Abfallverzeichnisverordnung). In: U.u.W. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft (Hrsg.), 2003

BMLFUW: Verordnung des Bundesministers für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft über Deponien (DVO 2008). In: U.u.W. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft (Hrsg.), 2008

Europäische Kommission: Verordnung (EU) Nr. 1357/2014 der Kommission vom 18. Dezember 2014 zur Ersetzung von Anhang III der Richtlinie 2008/98/EG des Europäischen Parlaments und des Rates über Abfälle und zur Aufhebung bestimmter Richtlinien. In: Europäische Kommission (Hrsg.), Brüssel, 2014

Die thermische Behandlung der Flugaschepellets bei 450 °C hat den Gesamtgehalt der Elemente Ag, As, Ba, Cd, Co, Cu, Fe, Mo, Pb, Sb, Sn und Zn nahezu nicht verändert. Die grenzwertrelevanten Parameter As und Cd lagen schon vor der thermischen Behandlung unter dem Grenzwert. Der ebenfalls grenzwertrelevante Parameter Pb liegt zwar auch darunter, es ist jedoch nicht auszuschließen, dass es durch Spitzen zu Überschreitungen kommen kann. Eine Erhöhung des Gesamtgehalts bei dieser Temperatur kann bei den

Elementen Cr und Ni beobachtet werden. Das verwendete Drehrohr besteht aus einer Legierung mit etwa 60 %Ni und 25 %Cr. Eine mögliche Erklärung für den hohen Gesamtgehalt ist, dass es durch die hohe Temperatur zu einem Übertrag von Ofenmaterial in die Pellets gekommen ist. Eine deutliche Verringerung des Gesamtgehalts wurde bei Hg erreicht. Damit liegt der Wert nach der thermischen Behandlung nahezu um den Faktor 29 unter den Grenzwerten.

Nach der thermischen Behandlung bei 950 °C sind die Gesamtgehalte der Elemente Ag, As, Ba, Co, Cu, Fe, Mo und Zn in der gleichen Größenordnung wie zuvor. Starke Anstiege der Konzentration sind bei den Elementen Cr und Ni um den Faktor sieben, respektive fünf zu verzeichnen. Beide sind jedoch nicht grenzwertrelevant und auch durch einen möglichen Übertrag von Ofenmaterial in die Pellets zu erklären. Leichte Anstiege sind bei Sn und Sb zu beobachten. Eine Abnahme der Konzentrationen sind bei den für Grenzwerte relevanten Parametern Cd, Hg und Pb zu sehen. Alle drei Elemente liegen nach der thermischen Behandlung deutlich unter den jeweiligen Grenzwerten.

Bei den Eluatgehalten sind bei einer Temperatur von 450 °C sowohl der Abdampfrückstand, als auch die Elemente Ag, As, Ba, Cd, Co, Cu, Mo, Ni, Sb, Se und Sn nahezu unverändert geblieben. Als kritischer Parameter kann hier Se angesehen werden, da dieser sehr nahe am Grenzwert der Deponieverordnung 2008 liegt. Der Abdampfrückstand liegt auch nach der thermischen Behandlung über dem Grenzwert. Eine Erhöhung der Löslichkeit ist beim Element Cr festzustellen, wodurch es zu einer Überschreitung des Grenzwertes der DVO 2008 kommt. Diese Erhöhung kann ebenfalls durch das Drehrohr erklärt werden, da auch der Gesamtgehalt mehr als verdoppelt wurde. Die Konzentration der Elemente Hg, Pb und Zn im Eluat konnte durch die thermische Behandlung gesenkt werden.

Die Eluatgehalte der Pellets nach der thermischen Behandlung bei 950 °C unterscheiden sich kaum für die Parameter Abdampfrückstand, Ag, As, Cd, Co, Cu, Ni, Sb und Sn. Bis auf den Abdampfrückstand, welcher den Grenzwert deutlich überschreitet, liegen die anderen Elemente unter der Nachweisgrenze und somit auch weit unter dem Grenzwert. Cr, Mo und Se lösen sich nach der thermischen Behandlung der Pellets mehr und führen zu einer Überschreitung der jeweiligen Grenzwerte. Der hohe Cr-Eluatgehalt kann mit der Versiebenfachung des Gesamtgehalts, im Vergleich zu den unbehandelten Pellets erklärt werden. Bei Mo und Se können sich jeweils durch die thermische Behandlung lösliche Verbindungen bilden, wie beispielsweise Molybdate im Fall von Mo und gut wasserlösliche selenige Säure im Fall von Se. Eine Absenkung der Löslichkeit konnte bei den Elementen Ba, Hg, Pb und Zn erreicht werden. Alle vier lagen auch vor der thermischen Behandlung unter dem Grenzwert.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die thermische Behandlung von Flugaschepellets auf den Gesamtgehalt von grenzwertrelevanten Parametern einen positiven Einfluss hat und dieser Einfluss bei höheren Temperaturen noch verbessert wird. Der Abdampfrückstand wird durch die thermische Behandlung kaum beeinflusst und liegt auch danach noch deutlich über den Grenzwerten. Zu Grenzwertüberschreitungen im Eluat kam es lediglich bei den Elementen Cr, Mo und Se. Für Cr kann dies durch den Transfer von Ofenmaterial in die Pellets erklärt werden, für Mo und Se durch die Bildung von löslichen Verbindungen.

Anzumerken ist bezüglich des Abdampfdruckstands und der Eluatgehalte, dass die Pellets nach der thermischen Behandlung im Technikum trocken aufgefangen und dann analysiert wurden. Die Abfallverbrennungsanlagen mit Rost- und Drehrohrfeuerung in Österreich sind durchwegs mit Nassentschlackern ausgestattet [4]. Die Schlacke fällt nach dem Rost oder Drehrohr dort hinein und kühlt ab. Selbiges würde mit den thermisch behandelten Pellets geschehen. Die Verweilzeit im Nassentschlacker beträgt etwa 1 Stunde und durch die Bildung von Calciumhydroxid aus Calciumoxid steigt dort der pH-Wert an, wodurch im Nassentschlacker eine Mobilisierung von Metallionen eintritt [21]. Es kann daher angenommen werden, dass Pellets welche aus dem Nassentschlacker ausgetragen werden weder beim Abdampfdruckstand, noch bei anderen Elementen im Eluat eine Überschreitung der Grenzwerte aufweisen würden.

3.4. Theoretische Überlegungen zu zukünftigen Entsorgungs- und Verwertungswegen

In Tabelle 6 ist die Konzentration der fiktiven Schlacke dargestellt und den Grenzwerten für die Entsorgungs- und Verwertung gegenübergestellt.

Tabelle 6: Gesamtgehalte anorganischer und organischer Bestandteile einer aliquoten Mischung aus thermisch behandelten Flugaschepellets und Schlacke einer MVA mit Rostfeuerung; Grenzwerte für Gesamtgehalte für eine Deponierung auf einer Reststoffdeponie lt. BMLFUW; Grenzwerte für die Verwertung in Österreich von Rückständen aus der Abfallverbrennung in der Tragschicht von Straßen lt. BMNT

Parameter		Fiktive Schlacke	Deponierung Reststoffdeponie Österreich	Verwertung Österreich
		mg/kg TM*		
Gesamtgehalte				
Silber	Ag	25	–	–
Arsen	As	5,8	5.000	–
Barium	Ba	1.500	–	–
Cadmium	Cd	60	5.000	–
Cobalt	Co	46	–	–
Chrom	Cr	510	–	800
Kupfer	Cu	4.700	–	–
Eisen	Fe	40.000	–	–
Quecksilber	Hg	0,12	20	–
Molybdän	Mo	12	–	–
Nickel	Ni	160	–	300
Blei	Pb	1.100	–	900
Antimon	Sb	180	–	–
Zinn	Sn	230	–	–
Zink	Zn	4.000	–	–
Organische Summenparameter				
TOC	%	0,79	5	10.000
Glühverlust (550 °C)	%	2,4	8	–
KW-Index		62	5.000	–

* ausgenommen TOC und Glühverlust | TM: Trockenmasse | TOC: total organic carbon | KW: Kohlenwasserstoff

Quellen:

BMLFUW: Verordnung des Bundesministers für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft über Deponien (DVO 2008). In: U.u.W. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft (Hrsg.), 2008

BMNT: Bundesabfallwirtschaftsplan 2017 – Teil 1, Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus, 2017

Tabelle 6 zeigt, dass auch für Schlacken aus einer Anlage, in der die gesamte anfallende Flugasche pelletiert und anschließend thermisch behandelt wird, eine Deponierung auf einer Reststoffdeponie zulässig ist. Gegen eine Verwertung in Österreich spricht allerdings die Grenzwertüberschreitung von Pb. In Tabelle 1 ist ersichtlich, dass dies auch für die reine Schlacke der Fall wäre und somit nicht durch die Flugaschepellets verursacht wird.

Aus diesen Ergebnissen folgt, dass eine entsprechende Schlackeaufbereitung vor einer allfälligen Verwertung im Straßenbau oder anderwärtigen Verwendung als Baustoff erforderlich ist. In Österreich ist es gängige Praxis, dass Schlacken vor der Deponierung aufbereitet werden, um deren Qualität zu verbessern und um Wertstoffe rückzugewinnen [4, 21].

4. Ausblick

Zur Verifizierung dieser wissenschaftlichen Betrachtungen, ist die Errichtung einer Pelletieranlage für Flugasche angedacht. So könnten Versuche im größeren Maßstab durchgeführt werden.

Aus den hier präsentierten Untersuchungen könnte sich abzeichnen, dass eine kombinierte Pelletierung und thermische Behandlung von Flugaschen eine vielversprechende Alternative zu den derzeit angewendeten Behandlungsverfahren (Untertage-deponierung, Stabilisierung) darstellen könnte. Es könnte durch die Pelletierung und thermische Behandlung aus einem gefährlichen Abfall ein nicht-gefährlicher Abfall gewonnen werden, welcher zusammen mit Schlacke auf einer Reststoffdeponie abgelagert werden dürfte.

5. Literatur

- [1] BMLFUW: Verordnung des Bundesministers für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft über ein Abfallverzeichnis (Abfallverzeichnisverordnung). In: U.u.W. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft (Hrsg.), 2003
- [2] BMLFUW: Verordnung des Bundesministers für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft über Deponien (DVO 2008). In: U.u.W. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft (Hrsg.), 2008
- [3] BMNT – Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus: Bundesabfallwirtschaftsplan 2017 – Teil 1, 2017
- [4] Böhmer, S.; Kübler, I.; Stoiber, H.; Walter, B.: Abfallverbrennung in Österreich Statusbericht 2006, Umweltbundesamt, 2006
- [5] Chandler, A.J.; Eighmy, T.T.; Hartlen, J.; Hjelmar, O.; Kosson, D.S.; Sawell, S.E.; van der Sloot, H.A.; Vehlow, J.: Municipal Solid Waste Incinerator Residues, 1997
- [6] Colangelo, F.; Messina, F.; Cioffi, R.: Recycling of MSWI fly ash by means of cementitious double step cold bonding pelletization: Technological assessment for the production of lightweight artificial aggregates, Journal of Hazardous Materials 299 (2015) 181-191
- [7] DIN – Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN EN 13657 – Charakterisierung von Abfällen Aufschluss zur anschließenden Bestimmung des in Königswasser löslichen Anteils an Elementen in Abfällen Deutsche Fassung EN 13657:2002, Normenausschuss Wasserwesen (NAW), 2002

- [8] DIN – Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN EN 12457-4 – Charakterisierung von Abfällen Auslaugung Übereinstimmungsuntersuchung für die Auslaugung von körnigen Abfällen und Schlämmen Teil 4: Einstufiges Schüttelverfahren mit einem Flüssigkeits-/Feststoffverhältnis von 10 l/kg für Materialien mit einer Korngröße unter 10 mm (ohne oder mit Korngrößenreduzierung), Normenausschuss Wasserwesen (NAW) im DIN, 2003
- [9] DIN – Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN EN ISO 11885 – Wasserbeschaffenheit – Bestimmung von ausgewählten Elementen durch induktiv gekoppelte Plasma-Atom-Emissionsspektrometrie (ICP-OES) (ISO 11885:2007); Deutsche Fassung EN ISO 11885:2009, Normenausschuss Wasserwesen (NAW), 2007
- [10] DIN – Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN EN 15216 – Charakterisierung von Abfällen – Bestimmung des Gesamtgehaltes an gelösten Feststoffen (TDS) in Wasser und Eluaten; Deutsche Fassung EN 15216:2007, Normenausschuss Wasserwesen (NAW), 2007
- [11] DIN – Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN EN 459-2 – Baukalk – Teil 2: Prüfverfahren; Deutsche Fassung EN 459-2:2010, Normenausschuss Bauwesen (NABau), 2010
- [12] Europäische Kommission: Verordnung (EU) Nr. 1357/2014 der Kommission vom 18. Dezember 2014 zur Ersetzung von Anhang III der Richtlinie 2008/98/EG des Europäischen Parlaments und des Rates über Abfälle und zur Aufhebung bestimmter Richtlinien. In: Europäische Kommission (Hrsg.), Brüssel, 2014
- [13] Forsmo, S.P.E.; Apelqvist, A.J.; Björkman, B.M.T.; Samskog, P.O.: Binding mechanisms in wet iron ore green pellets with a bentonite binder, Powder Technology 169 (2006) 147-158
- [14] Gul, A.; Sirkeci, A.A.; Boylu, F.; Guldan, G.; Burat, F.: Improvement of mechanical strength of iron ore pellets using raw and activated bentonites as binders. In: Physicochemical Problems of Mineral Processing 51 (2014)
- [15] Heinze, G.: Handbuch der Agglomerationstechnik, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2005
- [16] Huber, F.; Blasenbauer, D.; Mallow, O.; Lederer, J.; Winter, F.; Fellner, J.: Thermal co-treatment of combustible hazardous waste and waste incineration fly ash in a rotary kiln, Waste Management 58 (2016) 181-190
- [17] Huber, F.; Blasenbauer, D.; Winter, F.; Fellner, J.: Thermische Behandlung von Müllverbrennungsflugasche zusammen mit brennbaren gefährlichen Abfällen in einem Drehrohrofen. Jahrestreffen der ProcessNet-Fachgruppen: Abfallbehandlung und Wertstoffrückgewinnung, Energieverfahrenstechnik, Gasreinigung, Hochtemperaturtechnik, Rohstoffe, DECHEMA, VDI-GVC, ProcessNet, Frankfurt, 2017
- [18] Huber, F.; Herzel, H.; Adam, C.; Mallow, O.; Blasenbauer, D.; Fellner, J.: Combined disc pelletisation and thermal treatment of MSWI fly ash, Waste Management 73 (2018) 381-391
- [19] Stubenvoll, J.: The MR-Process Treatment of MSW Residues with Reclamation of Heavy Metals. In: Thomé-Kozmiensky, K. J. (Hrsg.): Recycling International. Berlin: EF-Verlag, 1989
- [20] Wei, N.: Leachability of Heavy Metals from Lightweight Aggregates Made with Sewage Sludge and Municipal Solid Waste Incineration Fly Ash. International Journal of Environmental Research and Public Health 12 (2015) 4992
- [21] Winter, B.; Szednyj, I.; Reisinger, H.; Böhmer, S.; Janhsen, T.: Abfallvermeidung und -verwertung: Aschen, Schlacken und Stäube in Österreich, Umweltbundesamt, 2005

Ansprechpartner



Dominik Blasenbauer, B.Sc.
Technische Universität Wien
Institut für Wassergüte und Ressourcenmanagement
Projektassistent
Karlsplatz 13/226
1040 Wien (A)
Telefon: 0043-1-58801-740028
E-Mail: dominik.blasenbauer@tuwien.ac.at