

Diplomarbeit

Fraktionierung von Müllverbrennungsschlacke mittels Dichtesortierung

unter der Betreuung von

Associate Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn.Johann Fellner

Projektass. Dipl.-Ing. Dr.techn.Florian Huber

Institut für Wassergüte und Ressourcenmanagement

E 226

eingereicht an der Technischen Universität Wien

Fakultät für Bauingenieurwesen

von

Zsombor Major

Matrikelnummer: 01642061

Kurzfassung

Der massenmäßig wichtigste Rückstand bei der Verbrennung von Siedlungsabfällen stellt die Müllverbrennungsschlacke dar. Jährlich werden in Wien bis zu 200.000 Tonnen dieses sekundären Abfalls auf der Deponie Rautenweg abgelagert. Im Rahmen des Christian Doppler Labors für anthropogene Ressourcen wurde eine detaillierte Charakterisierung von Müllverbrennungsschlacke (unterteilt nach unterschiedlichen Materialien und Korngrößen) durchgeführt, mit dem Ziel zu eruieren welche Fraktionen der Schlacke sich für eine Verwertung eignen. Aufbauend darauf wurden im Rahmen der gegenständlichen Masterarbeit Untersuchungen zur Dichtefraktionierung von Müllverbrennungsschlacken durchgeführt. Konkretes Ziel war es festzustellen inwiefern sich Schlacken aus der Abfallverbrennung durch Dichteseperation auftrennen lassen und wie sich die Qualität der unterschiedlichen Fraktionen darstellt.

Für die Beantwortung dieser Forschungsfragen wurde in einem ersten Schritt ein praktikables Dichtesortierungsverfahren im laboratorischen Maßstab entwickelt. Dabei wurden mit einem Schwimm-Sink Sortierungsverfahren unter Verwendung von Ferrosilizium drei Müllverbrennungsschlackenproben mit einer Korngröße von 4-8 mm in unterschiedlichen Dichtefractionen fraktioniert. Nach optischer und magnetischer Trennung der dadurch erhaltenen Fraktionen wurden die mineralischen Bestandteile und die erhaltenen Gläser für die chemische Analytik aufbereitet und danach mittels ICP-OES und RFA auf relevante Elemente analysiert.

Der Ergebnisse der Arbeit lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- 6 -15% der Proben weisen eine Dichte kleiner als 1700 kg/m^3 , 68-84% eine Dichte zwischen 1700 kg/m^3 und 2400 kg/m^3 auf und rund 8-18% der Schlacke besitzt eine Dichte größer 2400 kg/m^3 .
- In der höchsten Dichtefraktion mit einer Dichte größer als 3000 kg/m^3 , wurde eine Mindestkonzentration von Metallteilen von 75% erreicht.
- Die mineralischen Fraktionen mit einer Dichte größer als 2400 kg/m^3 haben einen Metallanteil zwischen 30% und 50%, deswegen könnten die in der Metallurgie verwertet werden.
- Anreicherungen von Schwermetallen im Glas befinden sich in den Fraktionen mit einer Dichte größer als 2400 kg/m^3 , bedingt durch Chalkogenidgläser.

Abstract

The major residue in the incineration of municipal solid waste in terms of mass is waste incineration bottom ash. Every year, up to 200,000 tonnes of this secondary waste are deposited at the Rautenweg landfill in Vienna. Within the framework of the Christian Doppler Laboratory for Anthropogenic Resources, a detailed characterization of waste incineration bottom ash (subdivided into different materials and particle sizes) was carried out with the aim of finding out which fractions of the bottom ash are suitable for recycling. Based on this, studies on density fractionation of waste incineration bottom ash were carried out as part of the present master's thesis. The concrete goal was to determine to what extent bottom ash from waste incineration can be separated by density separation and what the quality of the different fractions is.

In order to answer these research questions, a practicable density separation procedure on a laboratory scale was developed as a first step. Hereby, using a floating-sink sorting method using ferrosilicon, three waste incineration bottom ash samples having a grain size of 4-8 mm were fractionated in different density fractions. After optical and magnetic separation of the resulting fractions, the mineral constituents and the glasses obtained were prepared for chemical analysis and then analyzed for relevant elements by means of ICP-OES and RFA.

The results of the work can be summarized as follows:

- 6 -15% of the samples have a density of less than 1700 kg/m³, 68-84% have a density between 1700 kg/m³ and 2400 kg/m³ and around 8-18% of the bottom ash samples have a density of more than 2400 kg/m³,
- The mineral fractions with a density greater than 2400 kg/m³ have a metal content greater than 75%, which could be used in metallurgy.
- In the highest density fraction with a density greater than 3000 kg/m³, a minimum metal content of 75% was achieved.
- High concentrations of heavy metals in the glass are found in the fractions with a density greater than 2400 kg/m³, due to chalcogenide glasses.

Danksagung

Ich möchte mich besonders bei meinen Eltern dafür bedanken, dass sie mich in meiner Studium sowohl zu Hause als auch im Ausland unterstützt haben und ich auf Ihr immer zählen kann. Bei meiner Freundin bedanke ich mich besonders für alle Unterstützung, die ich von ihr während des Schreibens der Arbeit bekommen habe.

Großer Dank gebühren Herrn Prof. Fellner und Florian Huber, die meine Diplomarbeit betreut und begutachtet haben. Für die großartige Unterstützung und konstruktive Kritik bei Erstellung dieser Arbeit möchte ich mich ganz herzlich bedanken.

Ebenfalls möchte ich mich bei vielen Mitarbeitern des Forschungsbereichs Abfallwirtschaft und Ressourcenmanagement bedanken, dass sie meiner Arbeit immer Raum und Zeit gesichert haben. Großer Dank gebühren noch Manuel Hahn, Philipp Aschenbrenner und Ole Mallow, die mir mit viel Geduld und Hilfsbereitschaft in der laboratorischen Arbeit zur Seite standen.

Die vorliegende Arbeit ist Teil einer groß angelegten Forschungsinitiative zu anthropogenen Ressourcen (Christian Doppler Labor für Anthropogene Ressourcen). Ich bedanke für die finanzielle Unterstützung dieser Forschungsinitiative durch das Bundesministerium für Wissenschaft, Forschung und Wirtschaft und der Nationalstiftung für Forschung, Technologie und Entwicklung. Ohne die Unterstützung der MA 48, der WKU und Wien Energie wäre diese Arbeit so nicht möglich gewesen. Auch hierfür ein herzliches Dankeschön.

Inhaltverzeichnis

Abkürzungsliste.....	1
1. Einleitung.....	2
1.1. Müllverbrennungsanlagen	2
1.2. Verbrennungsrückstände	2
1.3. Materialeigenschaften der Müllverbrennungsschlacke	2
1.4. Mögliche Aufbereitungs- und Verwertungsmethoden der MVS	3
1.5. Dichtesortierung	6
2. Ziele und Fragestellung.....	8
3. Materialien und Methoden.....	9
3.1. Verwendete Geräte	9
3.2. Verwendete Chemikalien	9
3.3. Probematerial.....	9
3.3.1. Herkunft des beprobte MVS	9
3.3.2. Probenahme bei dem Rinterzelt	10
3.3.3. Probenaufbereitung	11
3.3.4. Mittlere Dichte der MVS.....	13
3.4. Dichtesortierung der MVS.....	14
3.4.1. Arbeitspunkte der Schwertrübe - Dichtefraktionen	14
3.4.2. Erzeugen geeigneter Schwertrübe.....	15
3.4.3. Dichtemessung der Schwertrübe.....	16
3.5. Methodenentwicklung der Dichtesortierung	16
3.5.1. Vorversuche	17
3.6. Durchführung der Experimente und Analyse.....	17
3.6.1. Dichtesortierung der Proben.....	17
3.6.2. Optische und magnetische Trennung der Fraktionen.....	19
3.6.1. Erstellung Eluate	20

3.6.2.	Vorbereitung der Fraktionen Glas und Mineralien für die Analyse.....	20
3.6.3.	Chemische Analyse– ICP-OES, RFA	21
4.	Ergebnisse	23
4.1.	Mittlere Dichte der MVS	23
4.2.	Massen- und Materialanteile der Dichtefraktionen	23
4.3.	Gesamtgehalte in den Dichtefraktionen	26
4.4.	Eluatgehalte der Proben.....	30
4.5.	Jährliches Aufkommen verwertbarer Fraktionen	30
5.	Schlussfolgerungen	31
6.	Literaturverzeichnis	33
7.	Anhang.....	36
7.1.	Gesamtgehalte der Feststoffproben	36
7.2.	Eluatgehalte	41
7.3.	Abbildungsverzeichnis	42
7.4.	Tabellenverzeichnis	43

Abkürzungsliste

MVA	Müllverbrennungsanlagen
MVS	Müllverbrennungsschlacke
SA	Siedlungsabfall
TM	Trockenmasse
FeSi	Ferrosilizium
ST	Schwertrübe
BG	Bestimmungsgrenze
DS	Dichtesortierung
NSA	Nass Schlackenausstrag
CD Labor	Christian Doppler Labor für Anthropogene Ressourcen
ICP-OES	Inductively coupled plasma optical emission spectrometry, optische Emissionsspektroskopie mittels induktiv gekoppelten Plasmas
RFA	Röntgenfluoreszenzanalyse
n.i.	nicht identifiziert, Massenanteil der Summe, der mit der Röntgenfluoreszenzanalyse nicht erfassbaren Elemente
z.B.	zum Beispiel
bzw.	beziehungsweise

1. Einleitung

1.1. Müllverbrennungsanlagen

Müllverbrennungsanlagen stellen ein wesentliches Element in modernen Abfallwirtschaftssystemen dar. Sie ermöglichen es das energetische Ressourcenpotentials in Siedlungsabfällen zu nutzen und reduzieren dabei gleichzeitig das Volumen des entstandenen Abfalls. Die erzeugte Energie wird entweder zu Strom umgewandelt oder als Fernwärme genutzt. Siedlungsabfälle werden im Allgemeinen in sogenannten Rostöfen bei Temperaturen größer 850°C verbrannt. Die Abfälle verweilen dabei zwischen 20 und 60 Minuten im Ofen, wobei organische Bestandteile des Abfalls vollständig mineralisiert werden. In diesem Temperaturbereich erfolgt auch die Hygenisierung des Materials.

Es gibt unterschiedliche Arten von MVA. Die größten Unterschiede sind zwischen den Feuerungsmethoden (Rostofen, Drehrohrofen, Drehetagenofen oder Wirbelschichtofen) und dem Abzug der inerten nicht brennbaren Rückstände (nasser Schlackenausstrag, trockener Schlackenausstrag). Im Rahmen der vorliegenden Arbeiten wurden Müllverbrennungsschlacken von Rostöfen mit einer Nassentschlackung untersucht, demzufolge beziehen sich die weiteren Beschreibungen auch auf diesen Typ der Abfallverbrennung.

1.2. Verbrennungsrückstände

Der größte feste Abfallstrom von Müllverbrennung ist die Müllverbrennungsschlacke. Aus jeder verbrannten Tonne Siedlungsabfall wird ungefähr 150-300 kg MVS produziert. Daneben entfällt noch zirka 10-30 kg Flugasche, ~5 kg Kesselasche, ~5kg Rückstandsrost (Dworak, et al., 2017).

1.3. Materialeigenschaften der Müllverbrennungsschlacke

Die MVS ist die inerte Fraktion des Abfalls, die aus unterschiedlichsten Materialien besteht. Die Hauptbestandteile von MVS sind Silizium, Kalzium, Eisen, Aluminium und Natrium (WGTT, 2006). Das Aussehen von MVS ist eine Mischung aus sehr feinen grauen porösen Materialien, genannt inerte Komponente, wie z.B. Metalle, Kies, Keramik, Steine, Glasstücke. Der pH-Wert der MVS ist stark basisch und liegt zwischen 12-13.

Aktuell werden die Verbrennungsrückstände (Schlacke und Asche) der Wiener thermischen Abfallverwertungsanlagen vor der Deponierung zu der Abfallbehandlungsanlage der MA48

geliefert und dort behandelt. Die Behandlung der Müllverbrennungsschlacke besteht in einem ersten Schritt aus Eisenmetall- und Buntmetallabscheidung. Danach wird das überwiegend mineralische Material durch Zugabe von Wasser (und Zement für den Fall, wenn auch Flugasche gemeinsam deponiert wird) einem erdfeuchten Schlacke-Aschebetongemisch abmischt. Am Ende dieses Prozesses wird dieses Material auf die Deponie Rautenweg geliefert und dort abgelagert. Jährlich werden so bis zu 200.000 Tonnen auf der Deponie Rautenweg eingebaut (wien.at).

MVS wird in Österreich derzeit zu fast 100% deponiert (Ausnahme: abgetrennte Metalle). Ausländische Beispiele zeigen, dass die Verwertung unterschiedlicher Materialien aus der MVS möglich und ökonomisch sein kann. Das deutet an, dass MVS in Österreich allenfalls noch ungenutztes Ressourcenpotential aufweisen können. Dieses Potential beinhaltet nicht nur die Schonung von Primärrohstoffen durch direkte Verwertung der MVS, sondern auch die Minimierung des Flächenbedarfs für Deponierung. Die gesetzlichen Kriterien der österreichischen Verwertung von MVS als Baustoff bzw. Baurohstoff sind im Bundesabfallwirtschaftsplan und in dem Regelwerk: Technische Grundlagen für den Einsatz von Abfällen als Ersatzstoffe in Anlagen zur Zementerzeugung definiert (Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus, 2017) (Bundesministerium für Land und Forstwirtschaft, 2017).

1.4. Mögliche Aufbereitungs- und Verwertungsmethoden der MVS

Der Hauptgrund für die Behandlung der MVS ist es wiederverwendbare Produkte zu erzeugen. Einige europäische Länder (z.B. Deutschland, Dänemark, Niederlande, Frankreich) verwerten heute schon 50% bis 100% ihrer MVS (WGTT, 2006). In den meisten Fällen wird MVS als Baumaterial im Straßenbau oder für ähnlichen Zwecke verwendet, während eine kleinere Menge als Zementersatz oder als Rohstoff in Zementproduktion zum Einsatz kommt. Diese Anwendungen benötigen eine Entfernung und Neutralisierung unerwünschter Fraktionen aus der MVS. Diese Fraktionen sind organische Rückstände und umweltrelevante chemische Elemente.

Grob zusammenfassend kann die MVS Aufbereitung die folgenden Schritte und Prozesse beinhalten:

- *Siebung und Zerkleinerung:*

Die Korngrößenverteilung der MVS ist meistens von der Zusammensetzung des Mülls und von der Anlageausstattung abhängig. Einerseits ist die Korngröße wegen den mechanischen Eigenschaften der MVS wichtig, andererseits ist für Baumaterialien eine optimale Korngrößenverteilung wichtig um nach den Einbauen ungewollte Setzungen zu verhindern (V. Bruder-Hubscher, et al., 2001). Siebe sind essentielle Bestandteile des Aufbereitungsprozesses, die in fast allen MVS Aufbereitungsanlagen verwendet sind. Meist verwendete siebe sind unterschiedlichsten Varianten von Flachsiebe (vibrierende, oszillierende,...) und Trommelsiebe.

- *Rückgewinnung magnetische und nichtmagnetische Metalle:*

Die Abtrennung von Metallen erfolgt durch Magnetabscheider und Wirbelstromabscheider. In einigen Fällen können noch Induktionssortiersysteme oder Röntgensortiersysteme installiert werden, um die Rückgewinnung von nichtmagnetischen Metallen (besonders Stahllegierungen) zu erhöhen. Eine Aufbereitungsanlage, die die oben genannten Rückgewinnungstechnologien in einer guten Kombination verwendet, kann 70-90% der Metalle aus der MVS zurückgewinnen (ISWA – Working group on energy recovery, 2015). Ein Nachteil von nassen oder halbtrockenen Sortierungsverfahren besteht darin, dass aufgrund des Vorhandenseins von Wasser feine MVS Teilchen aneinander oder an grobem Material haften und die magnetische oder Wirbelstromtrennung von anhaftenden Eisen- und Nichteisenmetallen behindern. Um dieses Problem zu mildern, wurden in der letzter Zeit neue MVS-Aufbereitungstechniken entwickelt. Ein Beispiel für eine solche neue Technologie ist die patentierte "Advanced dry recovery"(ADR). Die ADR-Technologie nutzt kinetische Energie, um die Bindungen aufzubrechen, die durch Feuchtigkeit und feine Partikel gebildet werden, und die Feianteile werden dann ballistisch von der Grobfraction getrennt. Die getrennte Fraktionen können schon mit den konventionellen Technologien aufbereitet werden (Verbinne, et al., 2016).

Wenn keine Metallabscheidung stattfindet, kann die Verwertung der MVS Probleme verursachen. Vorhandenes metallisches Aluminium führt zur Produktion von Wasserstoff (Rübner, et al., 2015) während Eisen zementgebundene Materialien verfärben kann. Insgesamt können so höhere Werte von ausgelösten Metallen in das Sickerwasser kommen. Die zurückgewonnenen Metalle werden über den Schrottmart der Metallindustrie als Rohstoff zugeführt.

- *Gezielte Schlackenalterung:*

MVS wird ausgebreitet im offenen Bereich gelagert und ausgewittert. Diese Methode beschleunigt die natürliche Oxidierung der Metalle und lässt die Oxide und Hydrate mit Wasser reagieren. Diese Reaktion reduziert die Auslaugbarkeit der Metalle und verringert potenzielle Auswirkungen auf die Umwelt. Für die Erreichung gewünschte niedrige Parameterwerte von Metallen im Sickerwasser, ist eine freie Lagerung von mindestens 3-4 Monaten wünschenswert. Das während der Lagerung produzierte Sickerwasser erfordert eine angemessene Entsorgung, da es hohe Konzentrationen an hochlöslichen Salzen und geringere Menge von Metallen enthalten kann (WGTT, 2006).

- *Thermische Behandlung:*

Thermische Behandlung für MVS und Flugasche kann eingesetzt werden, um noch stabileres Material zu erzeugen. Die thermischen Behandlungen sollen die Auslaugbarkeit umweltrelevante Bestandteile vermindern, toxische organische Verbindungen (organische Mikroverunreinigungen) zerstören, das Volumen der MVS weiter verringern und ein zur Verwendung geeignetes Material erzeugen.

Um die MVS sicher zu entsorgen oder wiederzuverwenden sind häufig unterschiedliche Behandlungsverfahren erforderlich. Es gibt drei Kategorien von thermischen Behandlungen: Verglasung, Sintern und Schmelzen. Die unterschiedlichen Verfahren lassen sich basierend auf den Eigenschaften des Endprodukts unterscheiden. Beim Sintern werden die Rückstände bis 700-1200°C erhitzt, um eine Rekonfiguration von festen Materialien zu erreichen. Der Sinterprozess kann die Auslaugbarkeit von Schwermetallen wie Ni, Cu, Zn und Pb erheblich reduzieren (Schneider, et al., 1994). Die Verglasung passiert in einem Temperaturbereich von 1100 bis 1500°C. Wenn genügend Menge von glasbildenden Komponenten zu Verfügung steht, entsteht eine glasartige Phase. Schmelzen der MVS ist zu der Verglasung ähnlich, aber da werden generell keine Zusatzstoffe gebraucht. Schmelzen passiert in einer Temperatur von 1200 bis 1600°C, da entsteht ein kristallines oder heterogenes Produkt durch Aufschmelzen des Materials. Mit der Verglasung und Schmelzen können verwertbare Produkte erzeugt werden, aber die Energiekosten dieser Verfahren waren im 2003 noch deutlich höher, als die Deponierungskosten der MVS (Lindberg, et al., 2015).

- *Deponierung oder Verwertung:*

Nach den notwendigen Kombinationen von den vorherigen Schritten wird MVS entweder deponiert oder als Baumaterial oder als Ersatzrohstoff verwertet.

1.5. Dichtesortierung

Die Dichtesortierung ist eine Methode, wo die Stück- oder Partikeldichte das wesentliche Trennmerkmal ist. Die Trennung erfolgt vorwiegend im Schwerkraftfeld oder im Zentrifugalkraftfeld (Jürgen, 2011). Im Rahmen dieser Arbeit wurde Schwimm-Sink-Sortierung verwendet, wo das nach stofflichen Gesichtspunkten zu trennende Gut in einem Trennmedium aufgegeben wurde, dessen Dichte zwischen den Dichten der spezifisch leichtesten und den spezifisch schwersten Bestandteilen der Aufgabe liegt und für jeden konkreten Fall in Abhängigkeit vom Prozessziel festgelegt wurde. In diesem Medium sollten die spezifisch schweren Körner absinken und spezifisch leichteren aufschwimmen (Sinkgut und Schwergut). Dieses Prinzip ist weit verbreitet in der Bergbauindustrie und im Metallrecycling. (Cofermin Rohstoffe, 2019). Einige industrielle Beispiele für die Verwendung von Schwimm-Sinksortierung mit FeSi sind in der Tabelle 3. angezeigt.

Tabelle 1.: Mögliche Schwerstoffe für Herstellung von Schwertrübe

Schwerstoff	Schwerstoffdichte in kg/m ³	max. erzielbare Trübedichte (ρ_t) in kg/m ³
Baryt BaSO ₄	4300...4700	2000
Ferrochrom etwa 15% Cr	etwa 7500	4200
Ferrosilizium (etwa 15% Si)	etwa 6900	3400
Quartzsand	etwa 2600	1400

Ein Partikel P kann sich in einer Schwertrübe erst bewegen, wenn die Fließgrenze τ_0 mit Hilfe der angreifenden Volumenkräfte überwunden wird:

$$\frac{|\rho_{s,P} - \rho_{Tr}| \cdot V_P \cdot g}{k_\tau \cdot \tau_0 \cdot A_P} > 1 \quad [1] \text{ (Jürgen, 2011)(S.146)}$$

- V_P Partikelvolumen; für Kugeln gilt $V_P / A_P = 2/3 d$.
- A_P Partikelanströmfläche (in Strömungsrichtung projiziert)
- k_τ Proportionalitätsfaktor, partikelform- und orientierungsabhängig
- τ_0 Fließgrenze

Tabelle 2.: k_τ -Wert verschiedener Körperform, adaptiert von (Jürgen, 2011)

Partikelform und Orientierung	Kugel	Würfel	Plättchen parallel
k_τ	0,95	1,3	0,5
Erforderliche Dichtediff. ($\rho_{S,P} - \rho_{Tr}$) in kg/m^3 , für $V_p=1\text{cm}^3$, $\tau_0=2\text{N/m}^2$	95	160	220

Tabelle 3.: Beispiele für die Verwendung von Schwimm-Sinksortierung mit FeSi aus der Bergbauindustrie

Anlage	Bauart	Aufgabegut			Schwerstoff	Trübedichte [g/cm^3]	Quelle
		Name	d [mm]	Rohdichte [g/cm^3]			
Bleiberg/ Kreuth, Österr.	WEMCO- Trommel- scheider	Pb-Zn-Erz	4-60	3,3-7,6	FeSi	~2,4	(Jürgen, 2011)
Miková, CR	TESKA- Scheider	Magnesit	10-40	3-3,1	FeSi	~3	
N.N.		Siderit	5-40	3,7-3,9	FeSi	3,1	
The Daniels Company	Rectangular heavy medium separator	Kohle	6-200	0,6-2,1	FeSi	~3	(Dunne, et al., 2019)

2. Ziele und Fragestellung

Es gab schon mehrere Studien europaweit, in denen die Zusammensetzung von MVS charakterisiert wurde. In Tschechien wurde MVS auf ihren Gehalt an Glas, magnetischen Metallstücke, nichtmagnetischen Metallstücken und unverbranntem organischen Material untersucht (Šyc, et al., 2017). Im Christian Doppler Labor für Anthropogene Ressourcen gibt es ein zurzeit laufendes Projekt um vollständige und detaillierte Daten über die Müllverbrennungsschlacke zu gewinnen.

Wie früher schon erwähnt, das Wiederverwertungspotential der MVS hängt maßgeblich von den chemischen Parametern der einzelnen Materialfraktionen ab.

Die Fragestellung dieser Arbeit ist, ob diese Materialfraktionen mit einer Sortiermethode, die die MVS nach ihrer Rohdichte unterteilt, geeignet ist um Fraktionen mit unterschiedlichen chemischen Eigenschaften (z.B. Gehalt an Metallen) zu erhalten.

Die Ziele dieser Arbeit sind:

- Schaffung einer Sortierung von MVS durch Dichtesortierungsverfahren im Labormaßstab.
- Analyse der chemischen Zusammensetzung der unterschiedlichen Dichtefraktionen der MVS.
- Identifizierung von Elementen, die sich in den einzelnen Dichtefraktionen eindeutig unterscheiden.
- Untersuchung möglicher Optimierungspotentiale der MVS Behandlung.
- Suche nach einfach verwertbaren Materialfraktionen.

3. Materialien und Methoden

3.1. Verwendete Geräte

- Pyknometer Volumen = 164ml
- Wage
- Kugelmühle
- Mühle FLSmidth, Scheibenschwingmühle, Essa LM201 Pulverising Mill
- Siebturm Retsch KS 1000
- Riffelteiler 37mm / 20 mm / 10 mm für jeweils 5 Liter Material
- Druckaufschluss Mikrowellensystem MLS Start 1500
- ICP-OES PerkinElmer, optisches Emissionsspektrometer mit induktiv gekoppeltem Plasma, Optima 8300
- RFA Thermo Scientific, Röntgenfluoreszenzanalysator, Niton XL3t GOLDD+

3.2. Verwendete Chemikalien

- Konzentrierte Salpetersäure ($\geq 65\%$)
- Konzentrierte Phosphorsäure ($\geq 65\%$)
- Konzentrierte Salzsäure (30%)
- Konzentrierte Tetrafluoroborsäure (35%)

3.3. Probematerial

3.3.1. Herkunft des beprobte MVS

In Wien gibt es vier Müllverbrennungsanlagen (Spittelau, Flötzersteig, Pfaffenau und die Simmeringer Haide). Davon sind drei Anlagen mit Rostfeuerung und nassem Schlackenausstrag ausgestattet. Diese Anlagen verwerten vorwiegend Siedlungsabfälle und deren Schlacken wurden im Rahmen des CD Labors beprobt. Die Standorte dieser drei MVA sind in Abbildung 1. markiert.

Die drei Anlagen die beprobt wurden sind:

- MVA Flötzersteig - A
- MVA Pfaffenau - B
- MVA Spittelau - C

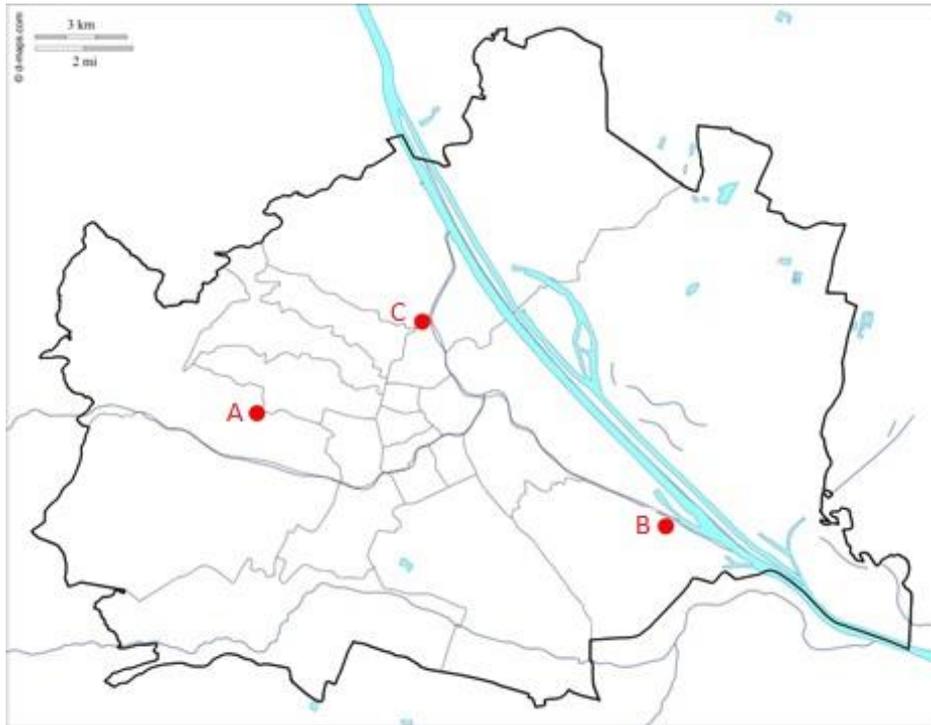


Abbildung 1: Standorte der drei beprobten Wiener MVA,
(d-maps.com kostenlose Karten)

3.3.2. Probenahme bei dem Rinterzelt

Die Probenahme der Untersuchungen wurden im Rahmen des großen MVS Charakterisierungsprojektes des CD Labors durchgeführt. Für jede Probenahme wurde eine LKW-Ladung mit MVS bestellt, die aus der MVA durch Zufall ausgesucht wurde und zu der Behandlungsanlage für Verbrennungsrückstände geliefert wurde. Die Ladung wurde dann mittels Radlader möglichst flach auf dem Boden ausgebreitet. Dann wurde das Schlackenbett mittels Schaufeln an mehreren gut verteilten Stellen vom Rand des Schlackenbetts beprobt. Das Material wurde Mittels Schubkarren umgelegt und immer abgewogen. Das Schlackenbett wurde immer in der ganzen horizontalen Größe geprobt, was so viel bedeutet dass immer bis zum Boden gegraben wurde. Nach einer durch Zufall verteilten Beprobung des Randbereichs wurde das Material mittels Radlader weggeschoben. Diese Prozesse wiederholen sich bis die Beprobung den inneren Bereich des ganzen Schlackenbetts erreichte. Aus der 20.000 kg schweren LKW-Ladung wurde eine Probemenge von mindestens 3.000 kg entnommen. (Huber, et al., 2018)

3.3.3. Probenaufbereitung

Die gesamte Stichprobe wurde mit einer Siebmaschine mit einem 16mm-Sieb gesiebt und auf Über- und Unterkorn verteilt. Das Überkorn wurde vor Ort völlig aufbereitet. Das Material wurde auf ein sich bewegendes 50mm-Sieb geschaufelt, dass die MVS in Über- und Unterkorn aufgeteilt. Das Überkorn wurde optisch sortiert, das Unterkorn gewaschen und nass sortiert. 800 kg MVS wurde aus der <16 mm-Fraktion für weitere Aufbereitung entnommen und auf mehreren Fraktionen nach deren Korngröße verteilt. So entstanden Fraktionen mit der Korngrößenverteilung von 12-16mm, 8-12mm, 4-8mm und 0-4mm. Für eine detaillierte Beschreibung der Korngrößenverteilung siehe Tabelle 3.



Abbildung 2: MVS <16mm bei der Probenahme

Tabelle 4. Korngrößenverteilung der MVS von den drei untersuchten MVA [kg/100 kg MVS TM], adaptiert von (Huber, et al., 2019). Diser Arbeit relevantante Ergebnisse hervorgehoben.

	Anlage A		Anlage B		Anlage C	
	Mittelwert	Standard-abweichung	Mittelwert	Standard-abweichung	Mittelwert	Standard-abweichung
>50 mm	7,5	1,1	6,1	1,0	6,7	3,9
16-50 mm	13,8	1,6	21,5	5,0	14,2	6,7
12-16 mm	6,0	0,9	13,5	2,2	7,8	4,8
8-12 mm	14,4	4,9	14,8	3,4	13,2	5,1
4-8 mm	13,9	7,1	9,0	4,7	10,4	7,7
2-4 mm	11,90	0,94	9,5	2,8	16,2	8,8
0.5-2 mm	19,1	5,5	13,6	3,1	17,6	5,6
0-0.5 mm	12,4	5,1	12,4	2,2	13,3	6,3
Aufgelöstes Material	1,07	0,22	0,80	0,44	0,60	0,45

Die Aufbereitung dieser Proben wurde in dem Laboratorium des Instituts für Abfallwirtschaft und Ressourcenmanagement durchgeführt.

Aus diesen vier Fraktionen wurde die 4-8mm Fraktion als Probematerial für weitere Untersuchungen für diese Arbeit ausgewählt. Der Grund dafür ist der Labormaßstab der weiteren Aufbereitungsprozesse. Eine weitere Abtrennung der Feinfraktion und pH-Neutralisierung der MVS war die Erwartung einer erfolgreichen Dichtesortierung. Die MVS wurde über ein Sieb mit einer Maschenbreite von 4mm so lange gewaschen, bis alle kleineren Partikeln abgetrennt wurden. Diese Behandlung reduziert spätere unerwünschte Veränderungen in der Dichte der Schwertrübe während des Prozesses der Dichtesortierung.



Abbildung 3: Waschen der 4-8 mm Fraktion

Der pH-Wert des Trennmediums sollte während kurzer Tests keinen Einfluss auf die Absatzcharakteristika des Ferrosiliciums haben. Das kann sich ändern, wenn mehr Zeit für die Korrosion des Ferrosiliciums zur Verfügung steht. Schlamm (sehr feine Partikel im Aufgabegut) haben eine sehr starke Auswirkung auf die Verringerung der Absatzgeschwindigkeit, besonders bei hohen mittleren Dichten und mit feineren Ferrosilicium-Partikeln. (Grobler, et al., 2002) Daneben bietet dieser Prozess gleichzeitig eine Möglichkeit die Materialfraktionen, die im Wasser schwimmen, einfach abzutrennen. Dadurch entsteht eine Sortierung von einer Dichte von 1g/cm^3 . Siehe Abbildung 4.



Abbildung 4: Links- Dichtesortierung im Wasser, Rechts- Probe B vor und nach der Behandlung mit 4%-er Salzsäure

Wie man auf der Abbildung 4 sieht, war eine Besonderheit der Probe B, dass die Oberfläche des Materials im Vergleich zu den anderen Proben viel mehr Oxide enthielt. Das hätte die Effektivität der späteren optischen Sortierung deutlich beeinflussen können. Deswegen wurde diese Probe in 4m%-er Salzsäure getaucht, um diese Film von deren Oberfläche bestmöglich zu entfernen.

Aus jeder MVS Probe wurde mindestens 2 kg TM für die Dichtesortierung vorbereitet. Die Tabelle 4 enthält die TM der Proben am Ende des Aufbereitungsprozesses.

Tabelle 5.: TM der aufbereiteten Proben in [g]

Anlage:	A	B	C
Einwaage [g]:	2020,8	2471,5	2239,3

3.3.4. Mittlere Dichte der MVS

Bei der Schwimm-Sink Sortierung ist die poröse Feststoffdichte (auch Rohdichte genannt) als Trennmerkmal entscheidend. Die mittlere Rohdichte jeder MVS Probe wurde gemessen, um die unterschiedlichen Dichtefractionen (Arbeitspunkte des Trennmediums) möglichst gleichmäßig zu verteilen und gut zu wählen.

Für die Bestimmung der Rohdichte der MVS wurde ein Pyknometer mit einem genauen Volumen von 164ml verwendet. Für jede Probe wurde die Rohdichte dreimal bestimmt. Die Messung wurde mit Material aus zufälligen Stellen der Proben durchgeführt. Die Rohdichte der MVS Proben wurden anhand der folgenden Formel berechnet:



Abbildung 5: Messung der mittlere Rohdichte der MVS Probe

$$\rho_P = \frac{M_G - (M_W + M_T)}{V_G - V_W} \quad [2]$$

- ρ_P Rohdichte der MVS Probe (g/cm³)
- M_G Gesamtgewicht (g)
- M_W Gewicht des Wasser (g)
- M_T Gewicht des leeren Pyknometers (g)
- V_G Gesamtvolumen des Pyknometers (cm³)
- V_W Volumen des Wasser (cm³)

3.4. Dichtesortierung der MVS

Für die Untersuchung wurde Ferrosilicium (FeSi) als Schwerstoff gewählt, weil hier das erreichbare Spektrum der Trübedichte gut zu der mittleren Dichte der MVS und der Arbeitspunkte des Versuchs passt. Mehr dazu in Kapitel 3.4.1.

FeSi wurde von der Firma Cofermin zu Verfügung gestellt, die aus 15% Si und 85% Fe besteht und eine Trockendichte von 6900 kg/m³ hat.

3.4.1. Arbeitspunkte der Schwertrübe - Dichtefractionen

Nach Feststellung der mittleren Dichten wurden die Arbeitspunkte der Schwertrübe gewählt. Die Arbeitspunkte sollten zwischen der maximal erreichbaren Trübedichte und der Dichte des Wassers liegen. Da der Sinkbeginn der Partikeln sowohl deren Dichte, als auch von der

Körperform abhängig ist (siehe Tabelle 2), wurden folgende drei Arbeitspunkte neben der Dichte des Wasser gewählt:

- 1,7 g/cm³
- 2,4 g/cm³
- 3 g/cm³

3.4.2. Erzeugen geeigneter Schwertrübe

Das Fließverhalten von Schwertrüben ist in industriellen Maßstab mit der Hilfe von Rührmaschinen einfach konstant zu halten. Der Einsatz von Reagenzzusätzen kann durch Ausbildung der Hydrathüllen der Partikeln (Hydrophobierung) oder Veränderung deren Dispergierungs bzw. Flockungszustand dieses Fließverhalten verändern oder stabilisieren. Eine Hydrophobierung der Schwerstoffpartikeloberflächen (Ferrosilizium) soll das Abgleiten der Doppelschichten durch die Um-orientierung der Krafrichtung der Wasserdipole entlang der Partikeloberfläche verbessern. Dadurch können die rheologischen Parameter (Fließgrenze und Plastizität) vermindert und Schwerstoffverluste minimiert werden. (Jürgen, 2011)

Als Reagenzzusatz wurde Kaolin gewählt, das ein feines, weißes Gestein ist. Um ein genaues Verhältnis von FeSi- Kaolin- und Wasser im Gemisch für die Arbeitspunkte der Schwertrübe zu bestimmen, wurde Gleichung [3] als Ausgangspunkt verwendet, und später mit empirischen Versuchen präzisiert. Ein Startverhältnis steht in der Tabelle 5.

$$\rho_{Tr} = \frac{m_S - m_1}{V_S - V_1} = \rho_1 + \varphi_1 * (\rho_S - \rho_1) \quad [3] \text{ (Jürgen, 2011)(S.143)}$$

ρ_{Tr}	Trübedichte (g/cm ³)
m_S	Feststoffmasse (g)
m_1	Flüssigkeitsmasse (g)
V_S	Feststoffvolumen (cm ³)
V_1	Flüssigkeitsvolumen (cm ³)
ρ_1	Flüssigkeitsdichte (g/cm ³)
ρ_S	Feststoffdichte (Schwerstoff) (g/cm ³)
φ_1	Feststoffvolumenanteil

Tabelle 6. Startverhältnis für Schwertrübe aus FeSi:

Dichte (g/cm ³)	3	2,4	1,7
Wasser (g)	100	100	100
FeSi (g)	356	219,5	93,8
Kaolin (g)	14	11	19

3.4.3. Dichtemessung der Schwertrübe

Der Pyknometer hat auf 20 °C ein bestimmtes Volumen von 164ml. Damit wurde nach der Formel [4] die Dichte der Schwertrübe gemessen.

$$\rho_{Tr} = \frac{M_G - M_T}{V_G} \quad [4]$$

ρ_{Tr}	Trübedichte (g/cm ³)
M_G	Gesamtgewicht (g)
M_T	Gewicht des leeren Pyknometers (g)
V_G	Gesamtvolumen des Pyknometers (cm ³)



Abbildung 6: Dichtemessung der Schwertrübe

3.5. Methodenentwicklung der Dichtesortierung

Die Aufgabe war es, einen Schwimm-Sink-Scheider in Labormaßstab zu entwickeln, wo der Schwimmgut- und Sinkgutaustrag separat möglich ist. Nach einigen Vorversuchen mit der Schwertrübe aus FeSi und nach der Bestimmung der Startverhältnisse in Kapitel 3.4.2. wurde ein Behälter mit einem Volumen von einem Liter als Trenngefäß gewählt. Dieser diente dazu die Fehler während der Sortierung minimal zu halten. Das begrenzt aber auch die verwendbaren Korngrößenfraktionen, die man effektiv sortieren kann, weil die Bewegung der Partikeln innerhalb der Trübe möglich sein muss. Deswegen entscheidet man sich die Fraktion mit 4-8 mm Korngrößendurchmesser zu verwenden. Diese Randbedingungen ermöglichen eine Filtration von 70-100 g Material pro Filtrierdurchgang. Die Rückgewinnung des Schwerstoffs im industriellen Maßstab passiert generell mit Magnetabscheidung, die eine Möglichkeit des quasi geschlossenen Systems ist. Diese Lösung war im Rahmen der Arbeit nicht möglich. Für die Rückgewinnung wurde daher Verdampfung des Wassers von der

Trübe verwendet, weil eine deutliche Verrostung des Schwerstoffes während des relativ kurzen Zeitraums der Untersuchung nicht zu erwarten war.

3.5.1. Vorversuche

Eine Veränderung der Dichte der Trübe ist während der Untersuchungen nicht auszuschließen. Um diese Veränderung analysieren zu können, wurden Vorversuche durchgeführt, die zeigten, dass diese Veränderung eine durch Wasserverlust entstehende Verdichtung ist. Deswegen war eine regelmäßige Kontrolle der Dichte während der Sortierung erforderlich, die je zugegebener 500 Gramm Material durchgeführt wurde. Die Kontrolle wurde mit einem Pyknometer durchgeführt. Eine genaue Einstellung der Dichte der Schwertrübe war nach jeder Messung erforderlich.

3.6. Durchführung der Experimente und Analyse

3.6.1. Dichtesortierung der Proben

Zu Beginn des Verfahrens wurde der pH-Wert des Aufgabeguts wie in Kapitel 3.3.3. beschrieben neutralisiert. Dafür wurde das Aufgabegut mehrmals in einem Kübel gewaschen und während dieser Durchgänge leicht aufgerührt. In dieser Phase wurde schon die erste Sortierung bei einer Dichte von 1g/cm^3 durchgeführt. Die Sortierung des Schwimmguts wurde bei allen Arbeitspunkten (Dichten) anhand von einem Sieb mit 0,5 mm Maschenweite ausgeführt. Nach der Abtrennung des Schwimmgutes und dem Erreichen eines pH-Wertes von 7-8, wurde das Material in den Trockenschrank gelegt und bei $105\text{ }^\circ\text{C}$ bis Massenkonzanz getrocknet.

Der Arbeitsablauf der Dichtesortierung findet sich in Abbildung 7.

Am nächsten Tag wurde mit der Sortierung in der Schwertrübe fortgefahren. Zuerst wurde die Schwertrübe mit der höchsten Dichte erstellt. Bei Erreichung einer konstanten viskosen Schwertrübe, wurde 70-100 Gramm von der vorbereiteten MVS der Trübe zugegeben. Unter ständigem Umrühren passiert die Dichtesortierung des Materials in kurzer Zeit. Die Schwimmgutabtrennung wurde mit der Hilfe des Siebs durchgeführt. Dieser Schritt wurde so oft wiederholt, bis die Einwaage des Materials von 500 Gramm erreicht wurde. Nachdem auf dem Boden der Schwertrübe eine größere Menge von Schwergut sich angehäuft hat, oder die Einwaage die 500g Grenze überschritten hat, wurde das ganze Trennmedium mit dem

Sediment in einen anderen Behälter umgefüllt und währenddessen wurde das Schwergut (Sediment) filtriert. Nach der Subtraktion einer Fraktion wurden die sortierten Materialien gespült und das Spülwasser mit dem Schwerstoff erfasst, um den Schwerstoffverlust zu minimieren. Vor der weiteren Sortierung in der Schwertrübe wurde deren Dichte gemessen und ggf. die genaue Dichte mittels Zugabe der benötigten Komponenten eingestellt.

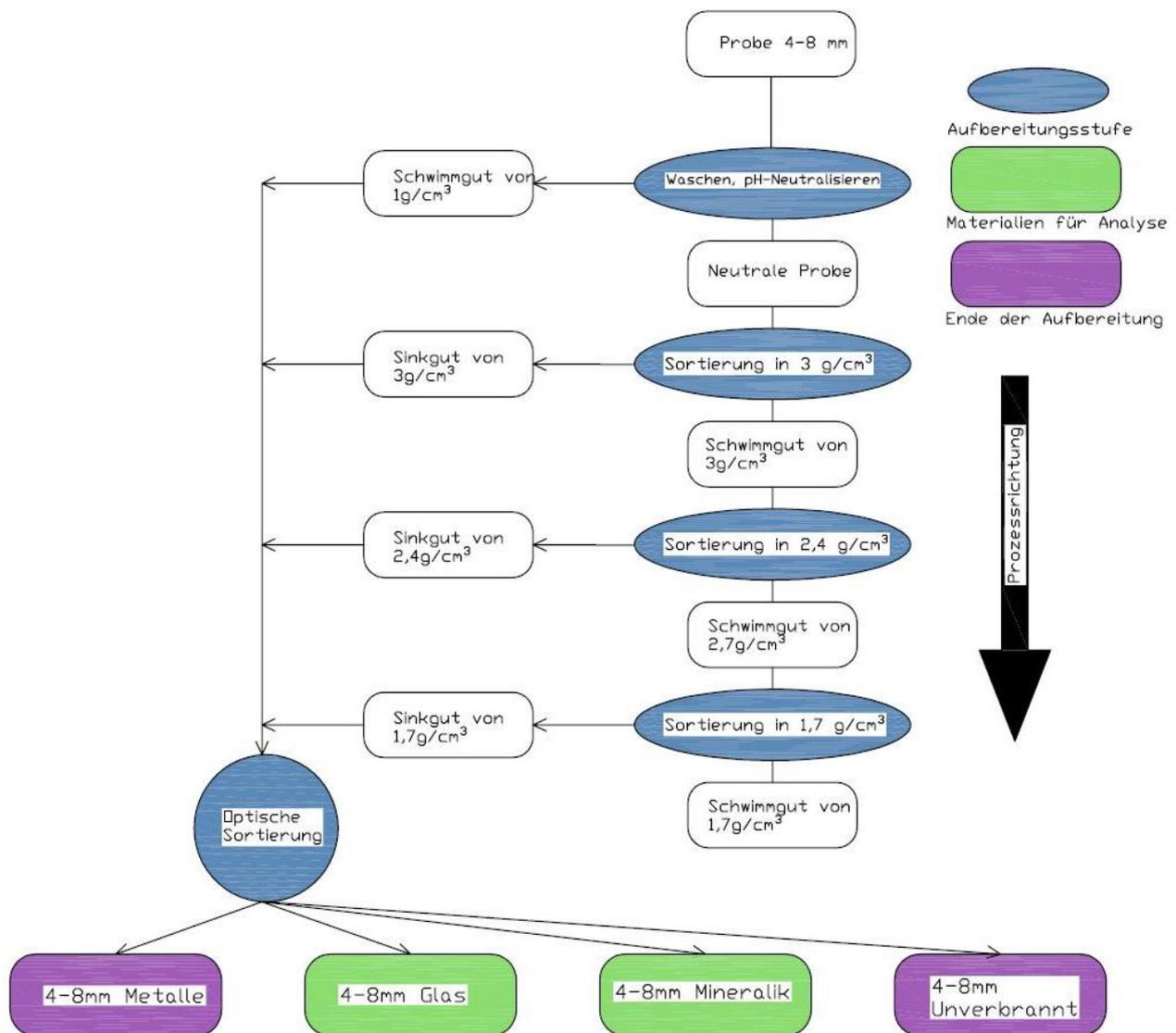


Abbildung 7: Arbeitsablauf der Dichtesortierung

Am Ende der Sortierung bei einem konkreten Arbeitspunkt (Dichte), wurde das ganze Schwimm- und Sinkgut getrennt über einen Sieb mit 4mm Maschenweite gewaschen, um die Schwerstoffpartikel völlig abzutrennen. Danach wurden alle Fraktionen im Trockenschrank bei 105 °C bis Massenkonstanz getrocknet und somit für die weitere Behandlung oder spätere Sortierung vorbereitet.

Die Sortierung wurde bei dem nächsten niedrigeren Arbeitspunkt der ST fortgeführt.



Abbildung 8: Aufgabegut und Schwertrübe während der Dichtesortierung

Am Ende des Sortierungsprozesses wurden die folgenden Fraktionen erfasst:

- Schwimmgut der ST 1 g/cm^3 – Rohdichte des Material $< 1 \text{ g/cm}^3$
- Schwimmgut der ST 1,7 g/cm^3 – $1 \text{ g/cm}^3 <$ Rohdichte des Materials $< 1,7 \text{ g/cm}^3$
- Sinkgut der ST 1,7 g/cm^3 – $1,7 \text{ g/cm}^3 <$ Rohdichte des Materials $< 2,4 \text{ g/cm}^3$
- Sinkgut der ST 2,4 g/cm^3 – $2,4 \text{ g/cm}^3 <$ Rohdichte des Materials $< 3 \text{ g/cm}^3$
- Sinkgut der ST 3 g/cm^3 – $3 \text{ g/cm}^3 <$ Rohdichte des Materials

3.6.2. Optische und magnetische Trennung der Fraktionen

Am Ende des Dichtesortierungsverfahrens wurden die drei MVS Proben in fünf Dichtefraktionen aufgeteilt. Für weitere Ergebnisse und um die chemische Analysen zu ermöglichen war die Klassifizierung der inhomogenen Fraktionen notwendig. Die Sortierung erfolgte in den folgenden Materialfraktionen:

- Unverbranntes Material
- Mineralische Bestandteile
- Glas
- Metalle:
 - Eisen
 - Aluminium
 - Kupfer
 - Messing
 - Stahllegierungen (bezeichnet als Niro)

oder optisch identifiziert. Aus den nicht identifizierbaren Stücken wurden später offene Aufschlüsse erstellt, um die genaue Menge von Metallen, die in mineralischen Bestandteilen eingeschlossen waren, zu bestimmen.

3.6.3. Chemische Analyse– ICP-OES, RFA

Die Aufbereitung der Proben für die chemischen Analysen wurden gemäß den Anweisungen des Großprojekts des CD Labors durchgeführt (Huber, et al., 2019). Die Gesamtgehalte von Al, Ca, Cl, Fe, K, Mg, P, Pb, S, Si, Ti wurden mittels Röntgenfluoreszenzanalyse bestimmt. Die Messungen wurden mit der RFA (NITON XL3t Air Hand-held Gun) in einer Bleikammer mit der Analysis-Mode „TestAll Geo“ durchgeführt.

Die Gesamtgehalte von Ag, As, Ba, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Mn, Mo, Na, Ni, Sb, Se, Sn, Tl, Zn der Feststoffproben wurden mittels ICP-OES gemessen. Für die ICP-OES Analyse wurden Proben mit 0-0,5mm Korngröße in einem Gemisch von 6ml HNO₃ (c=65%), 4ml H₃PO₄ (c=65%) und 2ml HBF₄ (c=35%) in einer Mikrowellenofen auf 240 °C durch 44 Minuten aufgeschlossen. Danach wurden die Proben nach EN 11885 (2009) mit der PerkinElmer Optima 8300 ICP-OES Spektrometer, ausgestattet mit SC-2 DX FAST Probenaufbereitungssystem, analysiert. Die Elemente wurden durch axiale Betrachtung und Dreifachbestimmung ermittelt, gefolgt von einer arithmetischen Mittelung. Zur Kalibrierung wurde ein kundenspezifischer Einzelementstandard (Merck, Roth) verwendet.

Alle Eluate wurden mit ICP-OES mit der oben beschriebenen Methode analysiert. Die elektrische Leitfähigkeit und der pH-Wert der Eluate wurden gemessen.

Die nach dem Mahlen erfassten restlichen Metallmengen wurden zuerst in konzentrierte Salzsäure gelegt, bis Eisen und Aluminium sich völlig aufgelöst haben. Dann wurden die Proben in einem anderen Becherglas dekantiert. Später wurden Kupferteile mit Salpetersäure aufgelöst. Vor der Messung mit ICP-OES wurden die Proben auf 10g/l Verhältnis verdünnt.

Eine vollständige Liste über die Proben und die verwendete Analysen befindet sich in der Tabelle 6.

Tabelle 7.: Bezeichnung der Proben und Liste der Analysen.

Probe Nr.	Beschriftung	Enthaltende Dichtefraktion	ICP-OES Gesamtgehalt	RFA	ICP-OES Offene Aufschlüsse
Z_01	A O1 MINERALIK	<1g/cm ³	•	•	
Z_02	B O1 MINERALIK	<1g/cm ³	•	•	
Z_03	C O1 MINERALIK	<1g/cm ³	•	•	
Z_04	A O1,7 MINERALIK	1-1,7 g/cm ³	•	•	
Z_05	B O1,7 MINERALIK	1-1,7 g/cm ³	•	•	
Z_06	C O1,7 MINERALIK	1-1,7 g/cm ³	•	•	
Z_07	A S1,7 MINERALIK	1,7-2,4 g/cm ³	•	•	
Z_08	B S1,7 MINERALIK	1,7-2,4 g/cm ³	•	•	
Z_09	C S1,7 MINERALIK	1,7-2,4 g/cm ³	•	•	
Z_10	A S2,6 MINERALIK	2,4-3 g/cm ³	•	•	
Z_11	B S2,4 MINERALIK	2,4-3 g/cm ³	•	•	
Z_12	C S2,4 MINERALIK	2,4-3 g/cm ³	•	•	
Z_13	A S3 MINERALIK	>3g/cm ³	•	•	
Z_14	B S4 MINERALIK	>3g/cm ³	•	•	
Z_15	C S3 MINERALIK	>3g/cm ³	•	•	
Z_16	A O1,7 GLAS	1-1,7 g/cm ³	•	•	
Z_17	B O1,7 GLAS	1-1,7 g/cm ³	•	•	
Z_18	C O1,7 GLAS	1-1,7 g/cm ³	•	•	
Z_19	A S1,7 GLAS	1,7-2,4 g/cm ³	•	•	
Z_20	B S1,7 GLAS	1,7-2,4 g/cm ³	•	•	
Z_21	C S1,7 GLAS	1,7-2,4 g/cm ³	•	•	
Z_22	5T5 S2,6 GLAS	2,4-3 g/cm ³	•	•	
Z_23	B S2,4 GLAS	2,4-3 g/cm ³	•	•	
Z_24	C S2,4 GLAS	2,4-3 g/cm ³	•	•	
Z_25	C O1 GLAS	<1g/cm ³	•	•	
Z_26	B S3 GLAS	>3g/cm ³	•	•	
Z_28	B S1,7 METALLE IM MINERALIK	1,7-2,4 g/cm ³			•
Z_29	C S1,7 METALLE IM MINERALIK	1,7-2,4 g/cm ³			•
Z_30	A S2,6 METALLE IM MINERALIK	2,4-3 g/cm ³			•
Z_31	B S2,4 METALLE IM MINERALIK	2,4-3 g/cm ³			•
Z_32	C S2,4 METALLE IM MINERALIK	2,4-3 g/cm ³			•
Z_33	A S3 METALLE IM MINERALIK	>3g/cm ³			•
Z_34	B S3 METALLE IM MINERALIK	>3g/cm ³			•
Z_35	C S3 METALLE IM MINERALIK	>3g/cm ³			•
E_1	A S1,7 ELUAT	1,7-2,4 g/cm ³	•		
E_2	B S1,7 ELUAT	1,7-2,4 g/cm ³	•		
E_3	C S1,7 ELUAT	1,7-2,4 g/cm ³	•		

4. Ergebnisse

4.1. Mittlere Dichte der MVS

Der Durchschnitt der drei Messungen wurde als mittlere Dichte ermittelt. Die Ergebnisse der Messungen sind in Tabelle 7. zusammengefasst.

Tabelle 8: Mittlere Dichte der Proben

Probe Nr.	Rohdichte	Mittlere Rohdichte
		[g/cm ³]
A-1	2,36	2,38
A-2	2,42	
A-3	2,35	
B-1	2,39	2,37
B-2	2,34	
B-3	2,37	
C-1	2,32	2,39
C-2	2,44	
C-3	2,42	

4.2. Massen- und Materialanteile der Dichtefraktionen

In Abbildung 11. sind die Ergebnisse der Dichtesortierung zusammengefasst. Auf jedem Diagramm sind die Ergebnisse der Dichtesortierung in m% bezüglich der Einwaage angegeben.

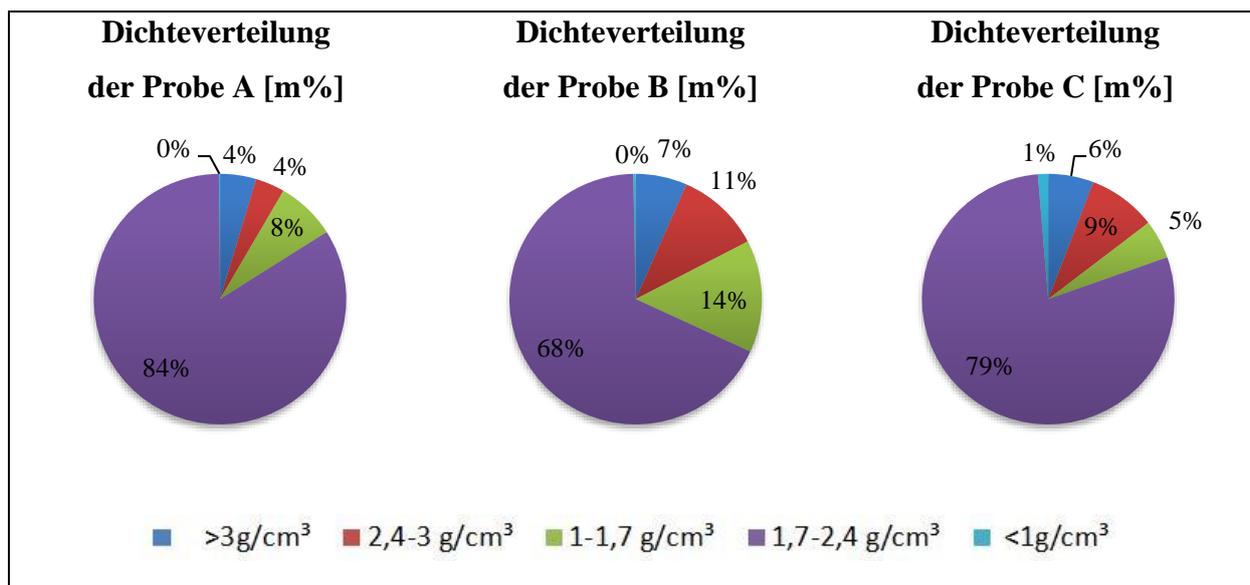


Abbildung 11: Dichteverteilung der MVS Proben A, B und C

Der größte Anteil der Materialien in der MVS Proben befinden sich in dem Bereich von 1,7-2,4 g/cm³. Das sind 68-84 m% der jeweiligen Proben. Das ist auch eine Bestätigung der Messungen der mittleren Dichten.

In den Tabellen 8-10 sind die Ergebnisse der optischen und magnetischen Sortierung in dem Gewicht der jeweiligen Fraktion angegeben. Diese Ergebnisse ergeben die Materialanteile in jeder Dichtefraktion. Die Metallmengen wurden mit den Ergebnissen der Analysen der offenen Aufschlüsse ergänzt. Die Metalle teilen sie sich hauptsächlich in nach deren Dichte geeignete Dichtefraktionen ein, aber die sind in anderen Fraktionen auch zu finden, weil die Schwimm-Sinkcharakteristikum der Partikel, wie in Kapitel 3.4. schon erwähnt, von mehreren Faktoren abhängig ist. Mehr als 50% der schwersten Fraktion mit einer Dichte höher als 3g/cm³ besteht aus optisch identifizierbaren Metallen. Das sieht man in Abbildung 12. Mineralische Bestandteile sind in allen Dichtefraktionen zu finden, während Glas sich hauptsächlich auf den Fraktionen > 1 cm³ bis < 3g/cm³ beschränkt.

Tabelle 9: Massenanteile von Materialien in MVS Probe-A nach Dichtesortierung:

MVA-A	Dichtestufen					SUM
	<1g/cm ³	1-1,7 g/cm ³	1,7-2,4 g/cm ³	2,4-3 g/cm ³	>3g/cm ³	
	[g]					
Mineralik	0,12%	7,28%	38,60%	3,31%	2,06%	51,38%
Glas		0,25%	38,90%	0,10%		39,25%
Unverbrannt	0,03%	0,07%	0,01%			0,10%
Eisen			0,59%	0,28%	1,24%	2,11%
Aluminium		0,08%	5,65%	0,04%	0,03%	5,81%
Kupfer			0,06%	0,01%	0,56%	0,62%
Messing					0,49%	0,49%
Niro			0,00%	0,01%	0,22%	0,23%
SUM	0,15%	7,68%	83,81%	3,76%	4,60%	100,00%

Tabelle 10: Massenanteile von Materialien in MVS Probe-B nach Dichtesortierung:

MVA-B	Dichtestufen					SUM
	<1g/cm ³	1-1,7 g/cm ³	1,7-2,4 g/cm ³	2,4-3 g/cm ³	>3g/cm ³	
	[g]					
Mineralik	0,26%	13,87%	44,04%	10,09%	3,20%	71,45%
Glas		0,23%	16,21%	0,09%		16,53%
Unverbrannt	0,03%	0,01%	0,00%			0,04%
Eisen			0,16%	0,67%	1,65%	2,48%
Aluminium		0,37%	7,24%	0,06%	0,04%	7,70%
Kupfer			0,02%	0,02%	0,84%	0,89%
Messing					0,67%	0,67%
Niro			0,00%	0,01%	0,24%	0,25%
SUM	0,29%	14,47%	67,67%	10,92%	6,64%	100,00%

Tabelle 11: Massenanteile von Materialien in MVS Probe-C nach Dichtesortierung:

MVA-C	Dichtestufen					SUM
	<1g/cm ³	1-1,7 g/cm ³	1,7-2,4 g/cm ³	2,4-3 g/cm ³	>3g/cm ³	
	[g]					
Mineralik	1,15%	4,92%	47,66%	8,06%	2,85%	64,64%
Glas		0,07%	26,98%	0,22%		27,26%
Unverbrannt	0,12%	0,01%	0,00%			0,13%
Eisen			0,05%	0,36%	1,73%	2,14%
Aluminium		0,02%	4,27%	0,21%	0,08%	4,58%
Kupfer			0,01%	0,02%	0,34%	0,37%
Messing					0,67%	0,67%
Niro			0,00%	0,03%	0,12%	0,16%
SUM	1,32%	5,02%	78,98%	8,89%	5,79%	100,00%

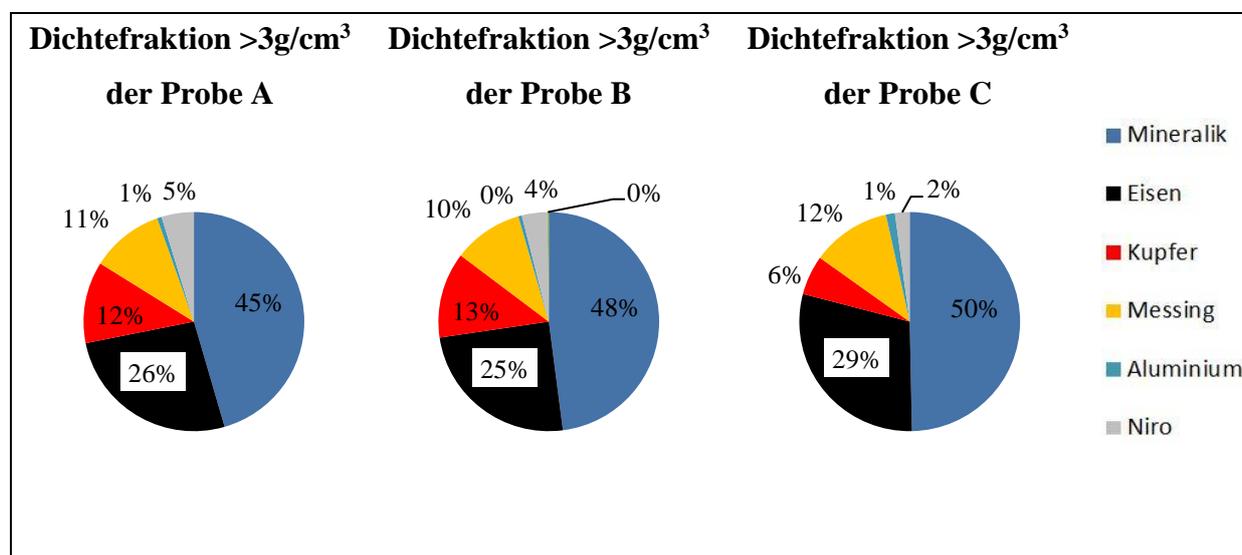


Abbildung 12: Erhöhte Konzentration von Metallen in der Fraktion >3g/cm³

Die Einwaagen und die Summe der sortierten Materialien zeigten Abweichungen. Eine Zusammenstellung dazu findet sich in der folgenden Tabellen.

Tabelle 12: Abweichung der Einwaage und Summe der sortierten Materialien::

[g] TM	A	B	C
1. TM vor Wäsche	11029,7	12435,61	3705,4
2. TM nach Wäsche	2020,8	2471,5	2239,3
3. TM nach Dichtesortierung und optische Sortierung	1921,07	2303,04	2260,55
Abweichung zwischen 2. Und 3.	4,94%	6,82%	0,95%
Unsicherheit der Aufbereitung	4,23%		

Aus der Abweichung zwischen 1. und 2. ergibt einen Feinanteil kleiner als 4mm von 40-80% in der 4-8mm Fraktionen.

4.3. Gesamtgehalte in den Dichtefractionen

Die Gesamtgehalte der Elemente wurden mit den ICP-OES und den RFA Analysen bestimmt. In diesem Kapitel werden einige relevante Ergebnisse hervorgehoben, aber eine vollständige Liste der Gesamtgehalte aller analysierten Elemente befindet sich im Anhang in den Tabellen G1-G5.

In Österreich sind gesetzliche Grundlagen der Verwertung der MVS in zwei Branchen definiert. Dies sind der Straßenbau und die Zementindustrie. Bei der Einhaltung der Grenzwerte der umweltrelevanten Elementen, darf MVS im Straßenbau in ungebundenen oder mit Bindemittel stabilisierten Tragschichten jeweils mit gering durchlässiger Deckschicht (hydraulische oder bituminöse Stabilisierung) eingebaut werden (Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus, 2017). In der Zementherzeugung darf MVS als Ersatzrohstoff verwendet werden, wenn der Ersatzrohstoff die relevanten Grenzwerte einhält (Bundesministerium für Land und Forstwirtschaft, 2017). Die Abbildung 13 zeigt, die Gesamtgehalte von für beide Anwendungen (Straßenbau und Zementindustrie) relevanten Elementen der mineralischen Fraktion 4-8 mm in jeder Dichtefraktion. Daneben sind jeweils die aktuellen Grenzwerte der jeweiligen Elemente angegeben. Der Hg-Gehalt der Proben wurde unter BG gemessen, deswegen ist er in Abbildung 13 nicht angegeben. Der Co-Gehalt der Proben wurde durch die Analysen nicht untersucht, weil die Ergebnisse der Analyse des gesamten MVS in keiner Probe den 250 mg/kg TM Kobalt Grenzwert überschritten haben.

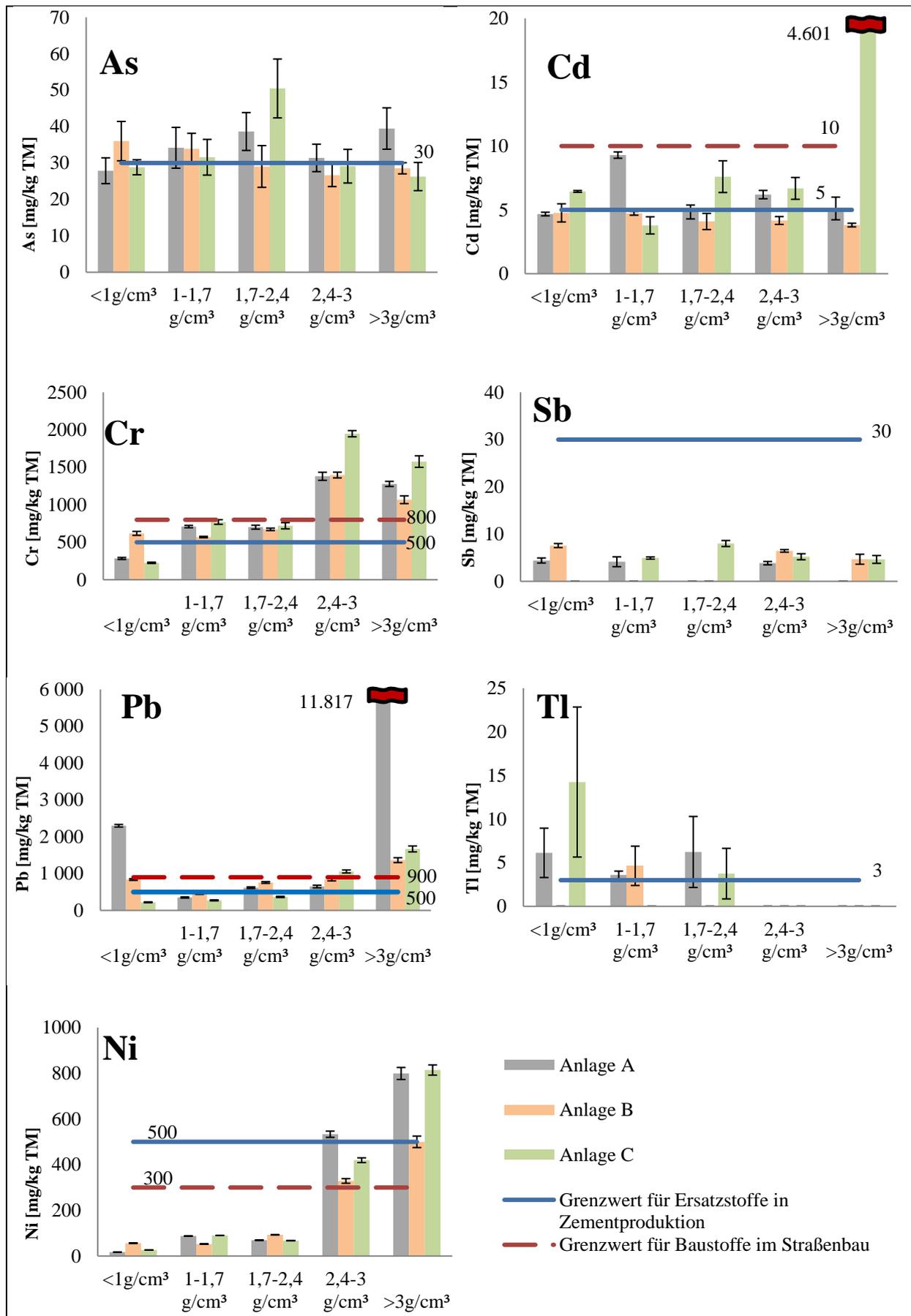


Abbildung 13: Gehalt von umweltrelevanten Elementen in der 4-8mm mineralischen Fraktion nach Dichtesortierung.

Die mineralischen Fraktionen mit einer Dichte kleiner $2,4 \text{ g/cm}^3$ können die Gesamtgehalts-Grenzwerte für die Verwendung als Baustoff im Straßenbau einhalten, das bedeutet aber noch kein mögliches Verwertungspotenzial. Eine mögliche Verwertung zu bestimmen, müssen noch die Eluatgehalte berücksichtigt werden.

Die Grenzwerte für Ersatzstoffe in der Zementproduktion wurden von allen Proben überschritten. Das Material könnte aber trotzdem begrenzt verwertet werden, mit Berücksichtigung der relevanten Gesamtgehalte der Endprodukte. (Bundesministerium für Land und Forstwirtschaft, 2017).

Die Schwermetalle konzentrieren sich in der schwersten mineralischen Fraktion mit einer Dichte $>3\text{g/cm}^3$ auf. Die Summe von Cu, Fe und Zn ergibt rund 50% der Gesamtmasse dieser Fraktionen. Wenn die Ergebnisse der Sortierung der MVS Fraktion $>3\text{g/cm}^3$ und die Ergebnisse der Analysen addiert werden, ergibt das einen Metallgehalt von mindestens 75% der Fraktion $>3\text{g/cm}^3$. Eine Darstellung der Metallgehalte in der 4-8 mm mineralischer Fraktionen ist in Abbildung 14 zu sehen.

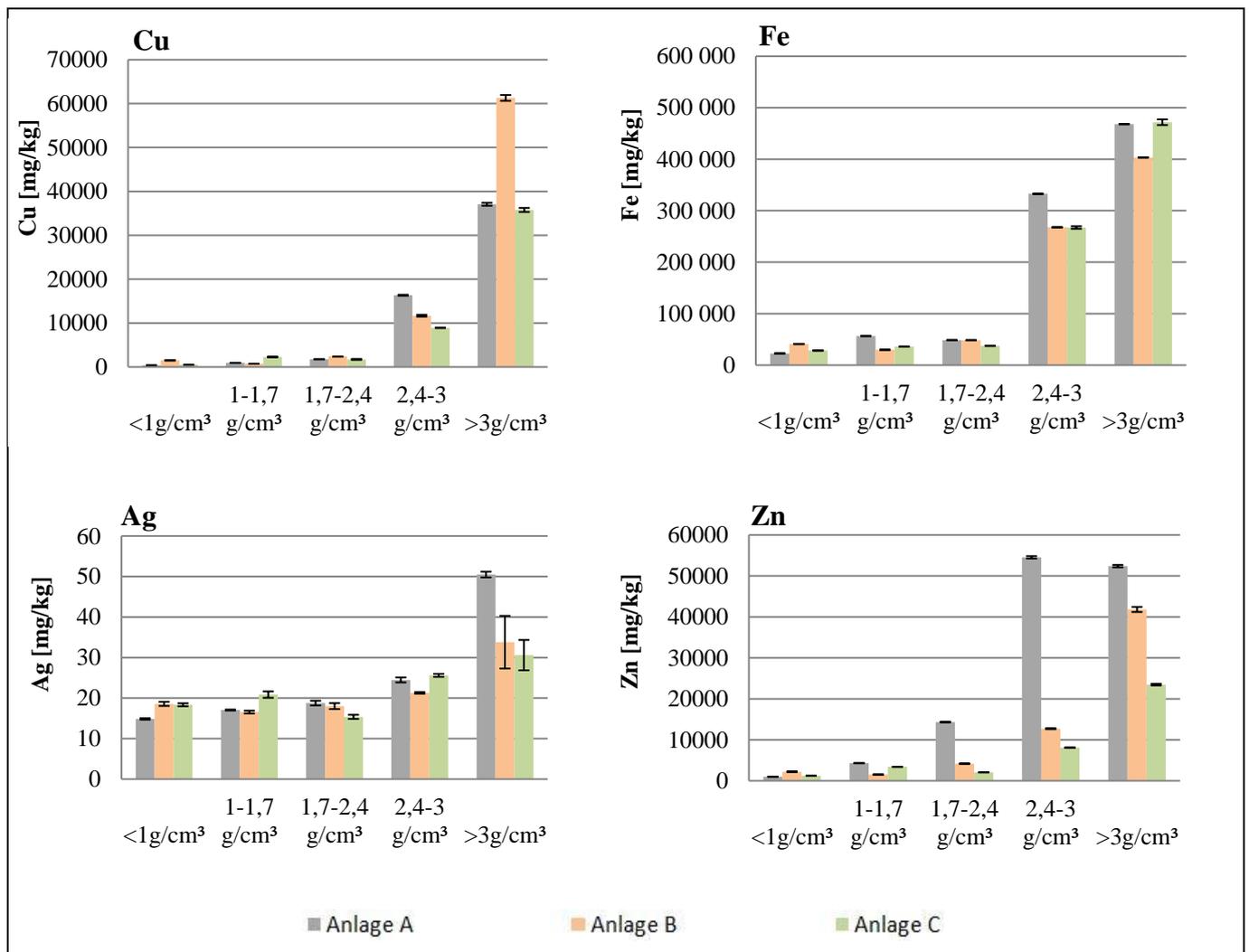


Abbildung 14: Schwermetallgehalt in der 4-8mm mineralischen Fraktion nach Dichtesortierung.

Wie in Abbildung 15 gezeigt wird, sieht man, dass Blei sich in der Glasfraktion 2,4-3 g/cm³ in einer Menge von 40-160 g/kg sammelt. Das ist mindestens um Faktor 10 größer als in der Fraktion mit der zweithöchsten Bleikonzentration.

Arsen, Thallium, Antimon und Schwefel sammeln sich ebenfalls in der Glasfraktion 2,4-3 g/cm³. Sulfiden, Telluriden, und z.B. der Elemente Arsen, Thallium, Blei werden meistens in der Produktion von Chalkogenidgläser verwendet. Sie werden als IR-durchlässiges Glas hergestellt.

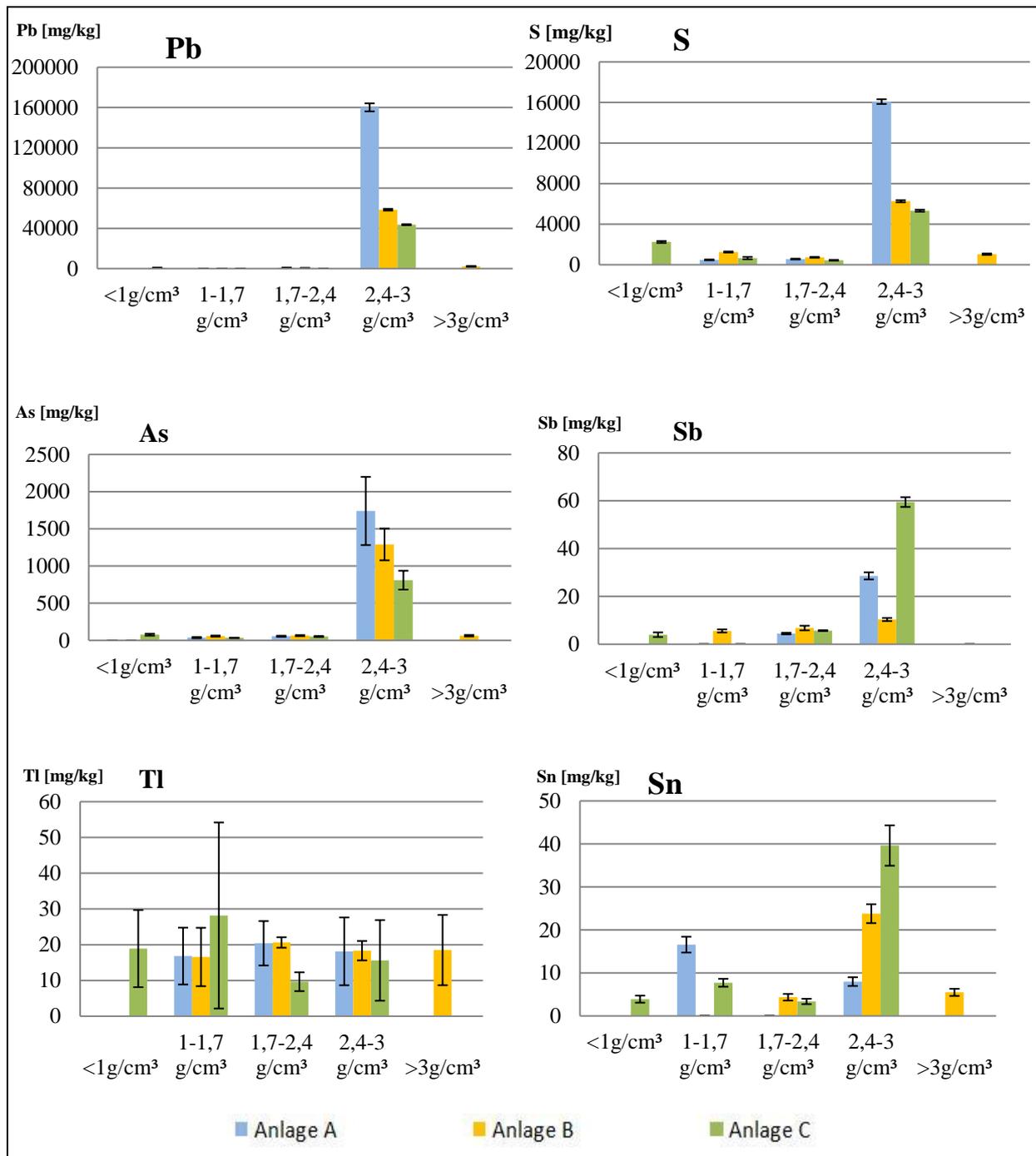


Abbildung 15: Abweichungen in dem Pb, S, As, Sb, Tl, Sn Gehalt der 4-8mm Glas Fraktion nach Dichtesortierung.

4.4. Eluatgehalte der Proben

Neben dem Gesamtgehalt wurde in dieser Arbeit auch der Eluatgehalt der massenmäßig größten mineralischen Fraktionen analysiert, die 61-75% aller analysierten mineralischen Fraktionen ausmachen. Aus den anderen Fraktionen konnte keine ausreichende Probemenge für eine Eluatherstellung gewonnen werden. entnommen werden.

Die Analysen zeigen, dass für die Verwertung relevante Grenzwerte nur hinsichtlich des Antimongehalts in Probe B und C überschritten werden. Probe A produzierte einen Antimon-Messwert unter der Bestimmungsgrenze von 0,18 mg/kg TM.

Abbildung 16. zeigt die für Verwertung relevanten Eluatgehalt in der mineralischen Fraktion 1,7-2,4 g/cm³. Das Waschen am Anfang der Aufbereitung hat lösliche Komponente entfernt und damit die Eluierbarkeit der mineralischen Fraktion wesentlich reduziert. Die Ergebnisse zeigen eindeutig niedrigere Werte im Vergleich zu den Ergebnissen von (Huber, et al., 2019), der die unterschiedliche Korngrößenfraktionen einem Eluattest unterzogen hat. Antimongehalte der Proben B und C können den 0,3 mg/kg TM Grenzwert für Verwertung immer noch nicht einhalten.

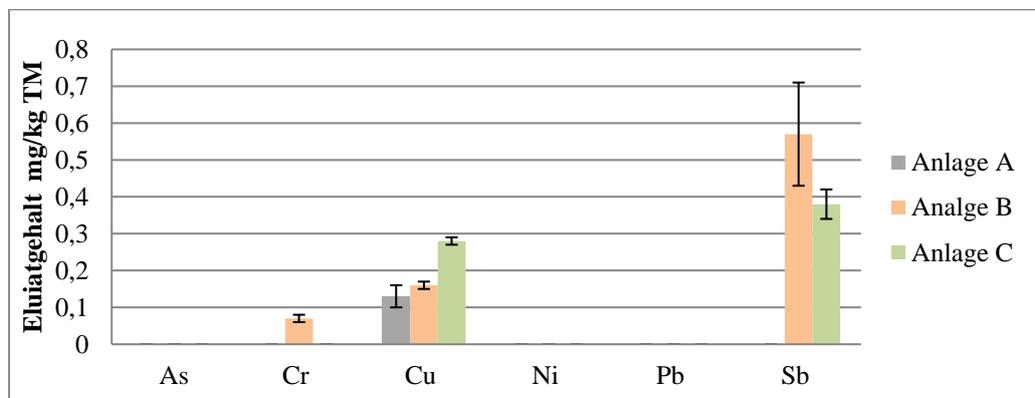


Abbildung 16: Eluatgehalt der 1,7-2,4 g/cm³ mineralischen Fraktionen

Eine vollständige Liste der Eluatgehalte befindet sich im Anhang in Tabelle E-1.

4.5. Jährliches Aufkommen verwertbarer Fraktionen

Mit den Ergebnissen von (Huber, et al., 2019) und den Ergebnissen der Analysen kann ein jährliches Aufkommen von Materialien in jeder Dichtefraktion der 4-8 mm Fraktion für jede beprobte Anlage berechnet werden.

Die mineralische Fraktionen $>2,4 \text{ g/cm}^3$ könnten wegen deren hohen Metallgehalten in der Metallurgie wiederverwertet werden. Ein jährliches Aufkommen der entsprechenden Mengen ist in Tabelle 12. zusammengefasst.

Tabelle 13.: Jährliches Aufkommen der 4-8mm mineralischen Fraktion

	Anlage A	Unsicher- heit	Anlage B	Unsicher- heit	Anlage C	Unsicher- heit	Quelle
MVS Produktion [t/a]	48000		48000		48000		(Wien Energie, 2015)
4-8 mm Fraktion der MVS	13,90%	7,10%	9,00%	4,70%	10,40%	7,70%	(Huber, et al., 2019)
Für Metallurgie geeignete mineralische Fraktionen in der 4-8mm MVS Fraktion	5,38%	4,23%	13,28%	4,23%	10,90%	4,23%	
Produktion für die Metallurgie geeignete mineralische Fraktionen [t/a]	359	41	574	51	544	65	

Ohne eine eindeutige Verbesserung der Eluatgehalte ist eine wesentliche Erhöhung der Verwertung der anderen Dichtefractionen von mineralischen Bestandteilen nicht vorhergesehen.

5. Schlussfolgerungen

Wie in der Zielsetzung bestimmt, wurde eine Dichtesortierung der MVS geschaffen. Mit einer Schwimm-Sinksortierung in einer Schwertrübe, die aus Ferrosilizium und Wasser hergestellt wurde, war die Fraktionierung der MVS bei gewählten Arbeitspunkten/Dichten möglich.

Die unterschiedlichen Dichtefractionen der 4-8 mm Fraktion der MVS zeigen unterschiedliche Anteile von umweltrelevanten chemischen Elementen. Für die Wiederverwertung relevante massenmäßig größte mineralische Fraktion, die 39-48% der untersuchten Proben ausmacht, hat eine mittlere Dichte zwischen 1700 kg/m^3 und 2400 kg/m^3 . Die kann aber die gesetzlichen Grenzwerte für Verwertung in den zwei untersuchten Industrien (Straßenbau und Zementproduktion) nicht einhalten. Begrenzender Parameter ist der Eluatgehalt von Antimon in dieser Fraktion. Mit einer nochmaligen Trennung des

Materials zwischen den Dichten 1700 kg/m^3 und 2400 kg/m^3 konnte wahrscheinlich keine geeignete Fraktion gewonnen werden, weil das Gesamtgehalt von Antimon kein Zusammenhang mit der Dichte der Fraktionen zeigt. Eine Möglichkeit wäre die weitere Reduktion der Eluierbarkeit, was während der Waschphase der Schwimm-Sinksortierung passieren konnte.

Die mineralische Fraktion mit einer Dichte größer als 2400 kg/m^3 kann wegen deren Metallgehalt von 30% bis 50% für die Metallurgie relevantes Ressourcenpotential aufweisen. Jährlich werden aus diesem Material in den drei beprobten Wiener MVA in dem Korngrößenbereich von 4-8 mm 1477 ± 157 Tonnen produziert. Diese Daten bieten eine gute Ausgangsstellung für eine breitere Untersuchung der MVS, die sich auch auf die anderen Korngrößenfraktionen ausdehnen kann.

Mit der Dichtesortierung mittels einer Schwimm-Sinksortierung ist eine erhöhte Konzentration von wertvollen Metallen in dem 4-8 mm Korngrößenbereich möglich. Während der Arbeit wurde in der höchsten Dichtefraktion eine Mindestkonzentration von 75% von Metallen erreicht. Die Rückgewinnung und Verwertung der Metalle aus dieser Fraktion könnte dadurch erhöht und damit der heute noch relativ hohe Verlust an wertvollen Metallen in dem kleineren MVS Fraktionen reduziert werden.

Im Bergbau werden generell Lösungen verwendet, wo die physischen Eigenschaften des Aufgabegutes ähnlich jener von MVS sind, aber die chemische Zusammensetzung homogener ist. Die dort angewendeten Lösungen wären für die Schwimm-Sinksortierung der MVS wahrscheinlich ähnlich geeignet. Eine Adaptation vom Bergbau befindet sich schon in einer österreichischen großtechnischen Anlage zur Schlackenaufbereitung. Da wird ein anderes Verfahren zur Dichtesortierung verwendet, wo das Trennmedium pulsierendes Wasser ist. Die Anlage ist schon seit 2013 in Betrieb. Das zeigt, dass Dichtesortierung im industriellen Maßstab für MVS ebenso anwendbar ist (Stockinger, 2016).

6. Literaturverzeichnis

Astrup, T., et al. 2016. Treatment and Reuse of Incineration Bottom Ash. *Environmental Materials and Waste*. S.635 : Elsevier, 2016.

Bethanis, S, Cheeseman, C.R. und Sollars, C.J. 2002. Properties and microstructure of sintered incinerator bottom ash. *Ceramics International*. Elsevier, 2002.

Bundesministerium für Land und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasser. 2017. *Technische Grundlagen für den Einsatz von Abfällen als Ersatzstoffe in Anlagen zur Zementerzeugung*. Wien : s.n., 2017.

Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus. 2017. *Bundes-Abfallwirtschaftsplan*. Wien Stubenring 1, 1010 : Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus, 2017. ISBN: 978-3-903129-33-7.

Cofermin Rohstoffe. 2019. Cofermin Rohstoffe. [Online] 2019. http://www.cofermin.de/rohstoffe_products.php?lang=DE.

d-maps.com kostenlose Karten. d-maps.com kostenlose Karten. [Online] [Zitat vom: 20. 02 2019.] https://d-maps.com/pays.php?num_pay=690&lang=de.

Dunne, Robert C., Kawatara, Komark S. und Young, Courtney A. 2019. *SME Mineral Processing and Extractive Metallurgy Handbook*. Colorado : Society for Mining, Metallurgy & Exploration, 2019. ISBN 978-0-87335-385-4.

Dworak, Sabine und Rechberger, Helmut. 2017. Thermische Abfallverwertung. 8a. *Reststoffverwertung*. s.l. : Institut für Wassergüte und Ressourcenmanagement, 2017. TU Wien.

Grobler, J.D, Sandenbergh, R.F. und Pistorius, P.C. 2002. The stability of ferrosilicon dense medium suspensions. 2002.

Huber, Florian und Blasenbauer, Dominik. 2018. *Arbeitsanweisung Schlackencharakterisierung*. E226 Institut für Wassergüte und Ressourcenmanagement : s.n., 2018.

Huber, Florian, et al. 2019. Chemical composition and leachability of differently sized material fractions of municipal solid waste incineration bottom ash. *Waste Management (submitted)*. 2019, Bd. Elsevier.

—. **2019.** Complete determination of the material composition of municipal solid waste incineration bottom ash. *Waste Management (submitted)*. 2019, Bd. Elsevier.

INDAVER. 2019. Recovering residues to save on raw materials. [Online] Indaver, 2019. <https://www.indaver.com/be-en/installations-processes/material-recovery/ash-treatment/>.

ISWA – Working group on energy recovery. 2015. *ISWA Report Bottom ash from WtE plants – Metal recovery and utilization*. 2015.

Jürgen, Thomas. 2011. *Vorlesung Aufbereitungstechnik und Recycling*. Magdeburg : Otto von Guericke Universität, 2011.

Lamers, Frans. 2015. Treatment of Bottom Ashes of Waste to Energy Installations. *Mineralische Nebenprodukte und Abfälle*. s.l. : TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2015.

Lindberg, Daniel, Molin, Camilla und Hupa, Mikko. 2015. Thermal treatment of solid residues from WtE units: A review. *Waste Management*. Elsevier, 2015.

Rübner, K., Haamkens, F. und Linde, O. 2015. Use of Municipal solid waste incinerator bottom ash as aggregate in concrete. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*. 2015.

Schneider, J, Vehlow, J. und Vogg, H. 1994. Improving the MSWI Bottom Ash Quality by Simple In-Plant. *Environmental Aspects of Construction with Waste Materials*. 1994, Bd. Elsevier.

Stockinger, Gerhard. 2016. *Nassaufbereitung von Abfallverbrennungssaschen - Betriebsergebnisse einer großtechnischen Anlage in Österreich*. 2016.

—. **2014.** *Verfahren zur Aufbereitung von Müllverbrennungsschlacke*. EP2818250A1 2014.

Šyc, Michal, et al. 2017. Material analysis of Bottom ash from waste-to-energy plants. *International Journal of Integrated Waste Management, Science and Technology*. 2017.

V. Bruder-Hubscher, et al., et al. 2001. Utilisation of bottom ash in road construction: Evaluation of the environmental impact, S553. *Waste Management & Research*. 2001, Bd. Sage Journals.

Verbinne, Bram, et al. 2016. *Recycling of MSWI Bottom Ash: A Review of Chemical Barriers*. Dordrecht : Springer Science+Business Media, 2016.

WGTT, ISWA. 2006. *Management of Bottom Ash from WTE Plants, An overview of management options and threatment methods*. Copenhagen, Denmark : s.n., 2006.

Wien Energie. 2015. *Sicherheitsdatenblatt - Schlacke der TBA Flötzersteig*. Wien : s.n., 2015.

—. **2015.** *Sicherheitsdatenblatt - Schlacke der TBA Pfaffenau*. Wien : s.n., 2015.

—. **2015.** *Sicherheitsdatenblatt - Schlacke der TBA Spittelau*. Wien : s.n., 2015.

wien.at. Abfallbehandlungsanlage (Rinterzelt). [Online]
<https://www.wien.gv.at/umwelt/ma48/entsorgung/abfallbehandlungsanlagen/aba/>.

7. Anhang

7.1. Gesamtgehalte der Feststoffproben

Tabelle G1: Gesamtgehalte der Elemente i in der 4-8mm MVS Proben, nach Dichtesortierung; ± gibt die jeweilige Standardabweichung an:

Probe Nr.	Bezeichnung	Dichte	Ag	As	Ba	Cd	Cr	Cu
			mg/kg TM					
Z_01	A O1 MINERALIK		14,842 ± 0,173	27,872 ± 3,548	530,51 ± 23,69	4,674 ± 0,142	283,87 ± 13,28	364,14 ± 19,93
Z_02	B O1 MINERALIK	<1g/cm ³	18,57 ± 0,501	36,006 ± 5,403	1375,86 ± 61,29	4,765 ± 0,712	618,73 ± 26,73	1504,91 ± 71,43
Z_03	C O1 MINERALIK		18,345 ± 0,369	28,825 ± 2,067	868,48 ± 26,76	6,447 ± 0,072	225,8 ± 8,16	480,2 ± 16,78
Z_04	A O1,7 MINERALIK		17,047 ± 0,117	34,172 ± 5,602	1024,22 ± 19,49	9,293 ± 0,249	709,53 ± 15,9	914,78 ± 22,04
Z_05	B O1,7 MINERALIK	1-1,7 g/cm ³	16,555 ± 0,351	33,912 ± 4,236	1187,74 ± 20,53	4,73 ± 0,147	569,96 ± 9,24	719,3 ± 16,01
Z_06	C O1,7 MINERALIK		20,853 ± 0,791	31,577 ± 4,904	2087,1 ± 27,5	3,785 ± 0,674	770,19 ± 31,12	2264,4 ± 38
Z_07	A S1,7 MINERALIK		18,763 ± 0,589	38,647 ± 5,197	1209,3 ± 40,13	4,835 ± 0,543	701,22 ± 25,96	1754,78 ± 56,41
Z_08	B S1,7 MINERALIK	1,7-2,4 g/cm ³	18,014 ± 0,737	29,039 ± 5,73	1848,4 ± 11,1	4,092 ± 0,636	672,22 ± 15,92	2359,4 ± 30,8
Z_09	C S1,7 MINERALIK		15,366 ± 0,506	50,464 ± 8,082	1776,43 ± 89,76	7,603 ± 1,243	720,53 ± 41,57	1722,51 ± 102,41
Z_10	A S2,6 MINERALIK		24,486 ± 0,621	31,388 ± 3,765	892,38 ± 34,7	6,197 ± 0,328	1380,3 ± 53,99	16335,3 ± 105,6
Z_11	B S2,4 MINERALIK	2,4-3 g/cm ³	21,27 ± 0,201	26,661 ± 3,144	1747,3 ± 25,5	4,167 ± 0,307	1396,79 ± 38,41	11674,5 ± 211
Z_12	C S2,4 MINERALIK		25,601 ± 0,365	29,115 ± 4,621	1508,08 ± 28,99	6,684 ± 0,855	1948,04 ± 41,57	8913,9 ± 64,4
Z_13	A S3 MINERALIK		50,496 ± 0,712	39,46 ± 5,672	2829,4 ± 19,4	5,112 ± 0,889	1278,21 ± 33,92	37069,7 ± 336,4
Z_14	B S4 MINERALIK	>3g/cm ³	33,794 ± 6,498	28,547 ± 1,531	1199,15 ± 58,33	3,811 ± 0,144	1067,09 ± 51,27	61290,3 ± 660,9
Z_15	C S3 MINERALIK		30,597 ± 3,745	26,27 ± 3,866	736,48 ± 26,96	4601 ± 194,5	1576,26 ± 76,52	35768 ± 453,2
Z_16	A O1,7 GLAS		13,529 ± 0,213	37,172 ± 7,643	677,33 ± 16,4	13,83 ± 2,667	1552,67 ± 29,11	1038,79 ± 19,85
Z_17	B O1,7 GLAS	1-1,7 g/cm ³	17,448 ± 0,212	57,873 ± 7,384	1150,71 ± 36,39	11,85 ± 0,662	879,82 ± 29,05	817,82 ± 27,22
Z_18	C O1,7 GLAS		14,936 ± 0,313	33,742 ± 3,593	9566,3 ± 69,6	6,06 ± 0,664	626,22 ± 27,61	174,48 ± 0,77
Z_19	A S1,7 GLAS		14,335 ± 0,244	55,73 ± 7,416	1214,44 ± 46,8	9,37 ± 0,78	753,5 ± 23,91	114,76 ± 0,203
Z_20	B S1,7 GLAS	1,7-2,4 g/cm ³	15,882 ± 0,667	64,267 ± 7,622	1213,13 ± 16,48	10,12 ± 0,812	658,36 ± 10,6	313,84 ± 5,36
Z_21	C S1,7 GLAS		13,374 ± 0,2	52,594 ± 7,416	1334,33 ± 30,24	9,72 ± 1,232	641,18 ± 12,74	267,08 ± 6,2
Z_22	5T5 S2,6 GLAS		17,164 ± 0,623	1740 ± 458,49	2147,1 ± 13,8	286,53 ± 74,27	221,88 ± 3,53	9432,9 ± 128,3
Z_23	B S2,4 GLAS	2,4-3 g/cm ³	18,225 ± 0,165	1290,3 ± 213,14	1148,19 ± 22,09	246,70 ± 25,3	517,3 ± 10,04	10398,7 ± 120,7
Z_24	C S2,4 GLAS		14,833 ± 0,227	809,54 ± 126,46	4542,9 ± 45,5	152,25 ± 24,34	765,6 ± 16,86	1619,97 ± 50,26
Z_25	C O1 GLAS	<1g/cm ³	21,714 ± 0,303	76,444 ± 12,854	550,72 ± 24,48	12,09 ± 1,67	831,43 ± 35,7	648,93 ± 33,6
Z_26	B S3 GLAS	>3g/cm ³	14,732 ± 0,24	63,303 ± 9,911	449,93 ± 12,97	11,31 ± 1,61	773,28 ± 21,47	372,43 ± 12,06

Tabelle G2: Gesamtgehalte der Elemente i in der 4-8mm MVS Proben, nach Dichtesortierung; ± gibt die jeweilige Standardabweichung an:

Probe Nr.	Bezeichnung	Dichte	Hg	Li	Mn	Na	Ni
			mg/kg TM				
Z_01	A O1 MINERALIK	<1g/cm ³	< BG = 0,07 ± --	97,267 ± 0,581	488,67 ± 23,68	14439,2 ± 603,1	17,228 ± 0,805
Z_02	B O1 MINERALIK		< BG ± --	79,258 ± 0,25	919,2 ± 45,32	5505,5 ± 164,8	56,483 ± 0,779
Z_03	C O1 MINERALIK		< BG ± --	98,418 ± 0,816	635,7 ± 22,5	11300,5 ± 150,5	26,656 ± 0,349
Z_04	A O1,7 MINERALIK	1-1,7 g/cm ³	< BG ± --	53,173 ± 0,187	1162,52 ± 30,41	15428,5 ± 174,1	87,724 ± 0,314
Z_05	B O1,7 MINERALIK		< BG ± --	63,961 ± 0,724	742,98 ± 15,77	17087,3 ± 484,9	52,889 ± 0,714
Z_06	C O1,7 MINERALIK		< BG ± --	64,443 ± 0,275	1018,58 ± 43,42	16276,1 ± 443,3	90,314 ± 0,33
Z_07	A S1,7 MINERALIK	1,7-2,4 g/cm ³	< BG ± --	44,892 ± 0,074	958,6 ± 30,37	21344,2 ± 351,6	69,437 ± 1,318
Z_08	B S1,7 MINERALIK		< BG ± --	51,541 ± 0,095	868,32 ± 22,95	16044,6 ± 252,1	93,121 ± 1,009
Z_09	C S1,7 MINERALIK		< BG ± --	56,432 ± 0,301	949,76 ± 49,46	29036 ± 392,3	67,618 ± 0,769
Z_10	A S2,6 MINERALIK	2,4-3 g/cm ³	< BG ± --	96,19 ± 0,89	3163,2 ± 16,6	6208,6 ± 79,7	533,21 ± 13,73
Z_11	B S2,4 MINERALIK		< BG ± --	29,211 ± 0,121	2377,1 ± 21,8	6593,3 ± 109	328,55 ± 10,07
Z_12	C S2,4 MINERALIK		< BG ± --	42,667 ± 0,317	3003 ± 19,5	10183,7 ± 99,3	419,45 ± 10,35
Z_13	A S3 MINERALIK	>3g/cm ³	< BG ± --	16,987 ± 0,111	3933,5 ± 33,2	5982,73 ± 217,68	799,26 ± 26,38
Z_14	B S4 MINERALIK		< BG ± --	21,956 ± 2,672	3584,6 ± 47,1	6659,78 ± 331,91	500,05 ± 25,18
Z_15	C S3 MINERALIK		< BG ± --	15,165 ± 1,546	5277,9 ± 55,8	6823,34 ± 287,62	814,14 ± 22,29
Z_16	A O1,7 GLAS	1-1,7 g/cm ³	< BG ± --	34,139 ± 0,08	367,24 ± 7,3	57.583,20 ± 715,6	61,009 ± 0,802
Z_17	B O1,7 GLAS		< BG ± --	39,546 ± 0,422	326,54 ± 10,95	52.205,40 ± 769,9	19,546 ± 0,598
Z_18	C O1,7 GLAS		< BG ± --	29,11 ± 0,17	308,25 ± 13,97	54.008,70 ± 812,2	16,375 ± 1,307
Z_19	A S1,7 GLAS	1,7-2,4 g/cm ³	< BG ± --	46,074 ± 0,445	156,87 ± 0,783	64.671,40 ± 1.084,60	9,417 ± 0,271
Z_20	B S1,7 GLAS		< BG ± --	39,872 ± 0,282	143,888 ± 1,112	61.396,20 ± 550,6	8,803 ± 0,729
Z_21	C S1,7 GLAS		< BG ± --	48,011 ± 0,446	151,087 ± 1,385	40.746,70 ± 427,6	8,397 ± 0,555
Z_22	5T5 S2,6 GLAS	2,4-3 g/cm ³	< BG ± --	40,061 ± 0,56	44,073 ± 0,253	37.063,20 ± 302,3	2,188 ± 0,405
Z_23	B S2,4 GLAS		< BG ± --	21,957 ± 0,077	556,69 ± 11,02	38.350,10 ± 727,4	7,035 ± 0,64
Z_24	C S2,4 GLAS		< BG ± --	38,508 ± 0,236	634,96 ± 17,1	35.204,10 ± 1.052,70	55,847 ± 0,489
Z_25	C O1 GLAS	<1g/cm ³	< BG ± --	28,998 ± 0,295	665,54 ± 29,74	51.258,80 ± 1.442,00	9,728 ± 0,301
Z_26	B S3 GLAS	>3g/cm ³	< BG ± --	38,276 ± 0,114	99,955 ± 0,966	40.931,20 ± 2.018,40	4,144 ± 0,291

Tabelle G3: Gesamtgehalte der Elemente i in der 4-8mm MVS Proben, nach Dichtesortierung; ± gibt die jeweilige Standardabweichung an:

Probe Nr.	Bezeichnung	Dichte	Sb	Se	Sn	Ti	Zn
			mg/kg TM				
Z_01	A O1 MINERALIK	<1g/cm ³	4,406 ± 0,53	< BG ± --	59,583 ± 4,5	6,131 ± 2,83	974,23 ± 42,53
Z_02	B O1 MINERALIK		7,573 ± 0,432	< BG ± --	< BG ± --	< BG ± 363	2207,7 ± 24,1
Z_03	C O1 MINERALIK		< BG ± --	< BG ± --	< BG ± --	14,245 ± 8,597	1234,51 ± 41,18
Z_04	A O1,7 MINERALIK	1-1,7 g/cm ³	4,149 ± 1,048	< BG ± --	< BG ± --	3,596 ± 0,438	4312,5 ± 54,5
Z_05	B O1,7 MINERALIK		< BG ± --	< BG ± --	< BG ± --	4,64 ± 2,253	1517,3 ± 27,89
Z_06	C O1,7 MINERALIK		4,94 ± 0,241	< BG ± --	< BG ± --	< BG ± --	3393,2 ± 35
Z_07	A S1,7 MINERALIK	1,7-2,4 g/cm ³	< BG ± --	< BG ± --	53,262 ± 3,855	6,231 ± 7,069	14320 ± 92,4
Z_08	B S1,7 MINERALIK		< BG ± --	< BG ± --	15,67 ± 1,228	< BG ± 253,5	4171,5 ± 39,6
Z_09	C S1,7 MINERALIK		8,007 ± 0,632	< BG ± --	7,814 ± 1,113	3,746 ± 2,896	2060,1 ± 21,9
Z_10	A S2,6 MINERALIK	2,4-3 g/cm ³	3,85 ± 0,349	< BG ± --	< BG ± --	< BG ± 47,86	54529,8 ± 292,9
Z_11	B S2,4 MINERALIK		6,453 ± 0,276	< BG ± --	< BG ± --	< BG ± --	12709,5 ± 118
Z_12	C S2,4 MINERALIK		5,21 ± 0,632	< BG ± --	7,477 ± 1,425	< BG ± 355,8	8093,1 ± 64,4
Z_13	A S3 MINERALIK	>3g/cm ³	< BG ± --	< BG ± --	10,913 ± 2,587	< BG ± --	52383,5 ± 285,4
Z_14	B S4 MINERALIK		4,679 ± 1,053	< BG ± --	15,495 ± 3,128	< BG ± --	41816,2 ± 622,7
Z_15	C S3 MINERALIK		4,645 ± 0,828	< BG ± --	28,687 ± 4,412	< BG ± --	23468 ± 203,2
Z_16	A O1,7 GLAS	1-1,7 g/cm ³	< BG ± --	< BG ± --	16,577 ± 1,839	16,81 ± 7,939	5153,4 ± 32,7
Z_17	B O1,7 GLAS		5,559 ± 0,645	< BG ± --	< BG ± --	16,56 ± 8,158	940,99 ± 27,3
Z_18	C O1,7 GLAS		< BG ± --	< BG ± --	7,721 ± 0,921	28,17 ± 26,02	504,08 ± 23,44
Z_19	A S1,7 GLAS	1,7-2,4 g/cm ³	4,447 ± 0,336	< BG ± --	< BG ± --	20,40 ± 6,20	523,46 ± 15,31
Z_20	B S1,7 GLAS		6,75 ± 0,968	< BG ± --	4,345 ± 0,767	20,62 ± 1,475	760,98 ± 11,45
Z_21	C S1,7 GLAS		5,673 ± 0,19	< BG ± --	3,364 ± 0,625	9,64 ± 2,628	572,05 ± 8,31
Z_22	5T5 S2,6 GLAS	2,4-3 g/cm ³	28,572 ± 1,473	< BG ± --	7,982 ± 1,009	18,14 ± 9,482	7986,8 ± 57,4
Z_23	B S2,4 GLAS		10,318 ± 0,635	< BG ± --	23,781 ± 2,186	18,32 ± 2,705	653,26 ± 12,95
Z_24	C S2,4 GLAS		59,449 ± 2,041	< BG ± --	39,632 ± 4,696	15,60 ± 11,27	1875,4 ± 45,34
Z_25	C O1 GLAS	<1g/cm ³	3,955 ± 0,98	< BG ± --	3,905 ± 0,821	18,90 ± 10,78	341,41 ± 14,4
Z_26	B S3 GLAS	>3g/cm ³	< BG ± --	< BG ± --	5,483 ± 0,828	18,50 ± 9,84	105,561 ± 0,385

Tabelle G4: Gesamtgehalte der Elemente i in der 4-8mm MVS Proben, nach Dichtesortierung; ± gibt die jeweilige Standardabweichung an:

Probe Nr.	Bezeichnung		Al	Ca	Cl	Fe	K	Mg
			mg/kg TM					
Z_01	5T4 O1 MINERALIK		35.752 ± 1.394	42.958 ± 675	7.172 ± 116	22.650 ± 274	18.177 ± 337	3.262 ± 1.266
Z_02	6T4 O1 MINERALIK	<1g/cm ³	31.549 ± 1.644	91.243 ± 1.016	7.053 ± 126	40.927 ± 401	14.004 ± 317	5.635 ± 1.830
Z_03	7T4 O1 MINERALIK		35.555 ± 1.417	52.736 ± 730	3.766 ± 88	28.392 ± 303	15.082 ± 306	4.838 ± 1.367
Z_04	5T4 O1,7 MINERALIK		32.631 ± 1.801	110.831 ± 1.188	2.623 ± 91	56.508 ± 536	13.290 ± 329	5.744 ± 2.088
Z_05	6T4 O1,7 MINERALIK	1-1,7 g/cm ³	30.439 ± 1.994	153.524 ± 1.297	4.747 ± 121	29.724 ± 327	9.040 ± 263	5.051 ± 2.433
Z_06	7T4 O1,7 MINERALIK		33.130 ± 1.794	114.918 ± 1.121	2.428 ± 91	36.040 ± 390	11.915 ± 284	2.863 ± 1.904
Z_07	5T4 S1,7 MINERALIK		37.096 ± 1.931	118.356 ± 1.226	2.094 ± 85	48.581 ± 480	9.229 ± 258	4.121 ± 2.131
Z_08	6T4 S1,7 MINERALIK	1,7-2,4 g/cm ³	21.969 ± 1.944	162.488 ± 1.447	3.861 ± 118	48.456 ± 497	7.279 ± 248	n.i. ±
Z_09	7T4 S1,7 MINERALIK		26.262 ± 1.664	133.678 ± 1.250	1.972 ± 83	37.444 ± 404	8.477 ± 239	3.437 ± 2.047
Z_10	5T4 S2,6 MINERALIK		36.212 ± 2.977	80.457 ± 1.641	2.429 ± 97	332.757 ± 3.002	4.808 ± 371	n.i. ±
Z_11	6T4 S2,4 MINERALIK	2,4-3 g/cm ³	27.236 ± 2.595	127.453 ± 1.832	3.073 ± 104	267.752 ± 2.507	3.415 ± 306	6.730 ± 3.800
Z_12	7T4 S2,4 MINERALIK		31.717 ± 2.755	115.637 ± 1.748	1.867 ± 95	267.312 ± 2.460	4.840 ± 340	n.i. ±
Z_13	5T4 S3 MINERALIK		31.397 ± 3.106	44.818 ± 1.384	2.276 ± 93	468.065 ± 5.696	2.451 ± 319	n.i. ±
Z_14	6T4 S4 MINERALIK	>3g/cm ³	34.081 ± 3.099	82.572 ± 1.699	3.166 ± 103	403.271 ± 4.343	2.236 ± 295	n.i. ±
Z_15	7T4 S3 MINERALIK		31.362 ± 2.885	52.153 ± 1.455	1.417 ± 80	471.760 ± 5.514	3.018 ± 341	8.398 ± 4.200
Z_16	A O1,7 GLAS		9.987 ± 979	74.961 ± 790	614 ± 59	13.335 ± 204	9.078 ± 186	2.549 ± 1.360
Z_17	B O1,7 GLAS	1-1,7 g/cm ³	10.755 ± 1.115	90.642 ± 877	2.055 ± 81	12.987 ± 201	8.256 ± 188	2.474 ± 1.537
Z_18	C O1,7 GLAS		11.558 ± 1.189	86.190 ± 892	657 ± 70	11.326 ± 197	12.351 ± 263	3.258 ± 1.681
Z_19	A S1,7 GLAS		6.269 ± 872	72.035 ± 725	573 ± 58	5.760 ± 113	7.381 ± 161	2.381 ± 1.301
Z_20	B S1,7 GLAS	1,7-2,4 g/cm ³	7.527 ± 900	74.823 ± 753	923 ± 61	5.076 ± 107	6.375 ± 158	2.592 ± 1.312
Z_21	C S1,7 GLAS		7.620 ± 942	75.500 ± 744	613 ± 60	5.268 ± 107	7.207 ± 161	2.716 ± 1.372
Z_22	5T5 S2,6 GLAS		17.767 ± 1.636	35.954 ± 1.106	1.912 ± 92	5.457 ± 302	33.759 ± 821	5.667 ± 2.125
Z_23	B S2,4 GLAS	2,4-3 g/cm ³	14.881 ± 1.368	72.603 ± 1.228	1.214 ± 74	40.117 ± 626	19.595 ± 457	2.962 ± 1.809
Z_24	C S2,4 GLAS		14.552 ± 1.389	82.425 ± 1.213	1.243 ± 75	39.974 ± 505	14.464 ± 379	4.375 ± 1.934
Z_25	C O1 GLAS	<1g/cm ³	17.813 ± 2.129	151.979 ± 1.444	1.846 ± 122	16.541 ± 287	12.210 ± 317	4.684 ± 3.006
Z_26	B S3 GLAS	>3g/cm ³	6.864 ± 1.228	96.926 ± 3.387	899 ± 85	6.124 ± 117	6.074 ± 275	3.276 ± 1.857

Tabelle G5: Gesamtgehalte der Elemente i in der mineralischen Fraktion der MVS; \pm gibt die jeweilige Standardabweichung an.

Probe Nr.	Bezeichnung		P	Pb	S	Si	Ti
			mg/kg TM				
Z_01	5T4 O1 MINERALIK		3.576 \pm 156	2.299 \pm 35	1.738 \pm 54	156.649 \pm 1450	2.802 \pm 71
Z_02	6T4 O1 MINERALIK	<1g/cm ³	3.169 \pm 176	838 \pm 22	3.161 \pm 77	117.491 \pm 1379	4.328 \pm 101
Z_03	7T4 O1 MINERALIK		3.310 \pm 153	221 \pm 11	1.240 \pm 48	151.650 \pm 1431	2.659 \pm 76
Z_04	5T4 O1,7 MINERALIK		4.300 \pm 196	352 \pm 16	1.946 \pm 66	143.322 \pm 1542	4.090 \pm 100
Z_05	6T4 O1,7 MINERALIK	1-1,7 g/cm ³	4.653 \pm 226	452 \pm 16	2.949 \pm 86	130.066 \pm 1568	8.134 \pm 166
Z_06	7T4 O1,7 MINERALIK		3.920 \pm 195	273 \pm 13	1.183 \pm 58	164.002 \pm 1653	3.755 \pm 89
Z_07	5T4 S1,7 MINERALIK		5.489 \pm 213	616 \pm 21	1.751 \pm 64	131.666 \pm 1506	3.043 \pm 94
Z_08	6T4 S1,7 MINERALIK	1,7-2,4 g/cm ³	5.596 \pm 249	758 \pm 23	2.227 \pm 81	117.442 \pm 1586	4.851 \pm 117
Z_09	7T4 S1,7 MINERALIK		6.164 \pm 219	367 \pm 15	1.282 \pm 58	142.366 \pm 1523	3.628 \pm 99
Z_10	5T4 S2,6 MINERALIK		3.325 \pm 199	650 \pm 36	1.299 \pm 63	65.671 \pm 1.254	5.199 \pm 230
Z_11	6T4 S2,4 MINERALIK	2,4-3 g/cm ³	3.555 \pm 206	839 \pm 37	1.652 \pm 69	78.685 \pm 1.332	6.659 \pm 252
Z_12	7T4 S2,4 MINERALIK		3.633 \pm 216	1.057 \pm 41	1.202 \pm 65	87.768 \pm 1.456	5.225 \pm 225
Z_13	5T4 S3 MINERALIK		n.i. \pm	11.817 \pm 318	2.684 \pm 144	38.506 \pm 993	3.476 \pm 247
Z_14	6T4 S4 MINERALIK	>3g/cm ³	2.678 \pm 185	1.365 \pm 65	1.567 \pm 65	53.269 \pm 1.133	5.334 \pm 243
Z_15	7T4 S3 MINERALIK		2.439 \pm 171	1.669 \pm 80	853 \pm 51	43.914 \pm 1.021	3.148 \pm 213
Z_16	A O1,7 GLAS		2.482 \pm 144	154 \pm 9	474 \pm 39	208.941 \pm 1660	1.006 \pm 58
Z_17	B O1,7 GLAS	1-1,7 g/cm ³	2.630 \pm 164	150 \pm 9	1.254 \pm 55	177.864 \pm 1641	2.231 \pm 67
Z_18	C O1,7 GLAS		6.704 \pm 3.151	120 \pm 9	649 \pm 116	217.676 \pm 1978	1.328 \pm 149
Z_19	A S1,7 GLAS		2.149 \pm 141	781 \pm 20	554 \pm 40	205.652 \pm 1661	702 \pm 54
Z_20	B S1,7 GLAS	1,7-2,4 g/cm ³	2.188 \pm 139	490 \pm 15	724 \pm 42	217.569 \pm 1667	1.068 \pm 61
Z_21	C S1,7 GLAS		2.160 \pm 145	229 \pm 11	444 \pm 40	213.466 \pm 1706	795 \pm 60
Z_22	5T5 S2,6 GLAS		2.959 \pm 177	160.164 \pm 3.975	16.087 \pm 232	176.589 \pm 1929	n.i. \pm
Z_23	B S2,4 GLAS	2,4-3 g/cm ³	2.773 \pm 164	58.509 \pm 836	6.264 \pm 106	192.196 \pm 1771	1.111 \pm 100
Z_24	C S2,4 GLAS		2.845 \pm 170	43.654 \pm 521	5.328 \pm 97	202.234 \pm 1744	2.393 \pm 159
Z_25	C O1 GLAS	<1g/cm ³	3.598 \pm 259	691 \pm 24	2.243 \pm 96	347.230 \pm 2357	1.832 \pm 108
Z_26	B S3 GLAS	>3g/cm ³	2.490 \pm 205	2.266 \pm 33	1040 \pm 68	258.558 \pm 6459	758 \pm 68

7.2. Eluatgehalte

Tabelle E1: Eluatgehalt der 1,7-2,4 g/cm³ mineralischen Fraktion; ± gibt die jeweilige Standardabweichung an.

	Eluat A 1,7			Eluat B 1,7			Eluat C 1,7		
pH-Wert	10,24			11,16			10,93		
Leitfähigkeit [m S/cm]	0,55			0,77			0,54		
Element	mg/kg TM								
Ag	< 0,030	±	--	< 0,030	±	--	< 0,030	±	--
As	< 0,180	±	--	< 0,180	±	--	< 0,180	±	--
Ba	1,14	±	0,00	1,27	±	0,01	0,81	±	0,00
Ca	900	±	13,00	1472	±	74,00	1029	±	52,00
Cd	0,07	±	0,01	0,09	±	0,11	0,03	±	0,01
Cr	< 0,060	±	--	0,07	±	0,01	< 0,060	±	--
Cu	0,13	±	0,03	0,16	±	0,01	0,28	±	0,01
Hg	< 0,057	±	--	< 0,057	±	--	< 0,057	±	--
Li	0,19	±	0,00	0,26	±	0,00	0,19	±	0,00
Mn	< 0,048	±	--	< 0,048	±	--	< 0,048	±	--
Na	223,6	±	4,30	20,4	±	0,70	16	±	0,40
Ni	< 0,033	±	--	< 0,033	±	--	< 0,033	±	--
Pb	< 0,360	±	--	< 0,360	±	--	< 0,360	±	--
Sb	< 0,180	±	--	1,6	±	0,10	2,8	±	0,10
Se	< 0,180	±	--	< 0,180	±	--	< 0,180	±	--
Sn	< 0,123	±	--	< 0,123	±	--	< 0,123	±	--
Tl	< 0,156	±	--	< 0,156	±	--	< 0,156	±	--
Zn	0,68	±	0,12	0,17	±	0,02	0,12	±	0,02

7.3. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Standorte der drei beprobten Wiener MVA, (d-maps.com kostenlose Karten)

Abbildung 2: MVS <16mm bei der Probenahme

Abbildung 3: Waschen der 4-8mm Fraktion

Abbildung 4: Links- Dichtesortierung im Wasser, Rechts- Probe B vor und nach der Behandlung mit 4% Salzsäure

Abbildung 5: Bestimmung der Rohdichte der Probe mittels eines Pyknometers

Abbildung 6: Bestimmung der Dichte der Schwertrübe mittels eines Pyknometers

Abbildung 7: Arbeitsablauf der Dichtesortierung

Abbildung 8: Aufgabegut und Schwertrübe

Abbildung 9: Ergebnisse der optischen Trennung der Probe C

Abbildung 10: Scheibenschwingmühle (Links); Vorbereitete mineralische (Mittel) und Glas (Rechts) Proben für die chemische Analyse

Abbildung 11: Dichteverteilung der MVS Proben A, B und C

Abbildung 12: Erhöhte Konzentration von Metallen in der Fraktion $>3\text{g/cm}^3$

Abbildung 13: Massenanteil von umweltrelevanten Elementen in der 4-8mm mineralischen Fraktion.

Abbildung 14: : Schwermetallgehalt in der 4-8mm mineralischen Fraktion nach Dichtesortierung

Abbildung 15: Abweichungen in dem Pb, S, As, Sb, Tl, Sn Gehalt der 4-8mm Glas Fraktion nach Dichtesortierung.

Abbildung 16: Eluatgehalt der $1,7\text{-}2,4\text{ g/cm}^3$ mineralischen Fraktionen

7.4. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1.: Mögliche Schwerstoffe für Schwertrübe Herstellung

Tabelle 2.: k_{τ} - Wert verschiedener Körperform, adaptiert von (Jürgen, 2011)

Tabelle 3.: Beispiele für die Verwendung von Schwimm-Sinksortierung mit FeSi aus der Bergbauindustrie

Tabelle 4. Korngrößenverteilung der MVS von den drei untersuchten MVA [kg/100 kg MVS TM], adaptiert von (Huber, et al., 2019)

Tabelle 5: TM der aufbereiteten Proben in [g]

Tabelle 6. Startverhältnis für Schwertrübe aus FeSi

Tabelle 7.: Bezeichnung der Proben und Liste der Analysen.

Tabelle 8: Mittlere Dichte der Proben

Tabelle 9: Massenanteile von Materialien in MVS Probe-A nach Dichtesortierung

Tabelle 10: Massenanteile von Materialien in MVS Probe-B nach Dichtesortierung

Tabelle 11: Massenanteile von Materialien in MVS Probe-C nach Dichtesortierung

Tabelle 12: Abweichung der Einwaage und Summe der sortierten Materialien::

Tabelle 13.: Jährliches Aufkommen der 4-8mm mineralischen Fraktion

Tabelle G1: Gesamtgehalte der Elemente i in der 4-8mm MVS Proben, nach Dichtesortierung; \pm gibt die jeweilige Standardabweichung an:

Tabelle G2: Gesamtgehalte der Elemente i in der 4-8mm MVS Proben, nach Dichtesortierung; \pm gibt die jeweilige Standardabweichung an:

Tabelle G3: Gesamtgehalte der Elemente i in der 4-8mm MVS Proben, nach Dichtesortierung; \pm gibt die jeweilige Standardabweichung an:

Tabelle G4: Gesamtgehalte der Elemente i in der 4-8mm MVS Proben, nach Dichtesortierung; \pm gibt die jeweilige Standardabweichung an:

Tabelle G5: Gesamtgehalte der Elemente i in der mineralischen Fraktion der MVS; \pm gibtdie jeweilige Standardabweichung an.

Tabelle E1: Eluatgehalt der 1,7-2,4 g/cm³ mineralischen Fraktion; \pm gibt die jeweilige Standardabweichung an.