

# Kreislaufwirtschaft - Die Zukunft ist zirkulär



**Auftraggeber:**

Dr. Kaarina Schenk  
FHNW, Hochschule für Technik  
Institut für Biomasse und Ressourceneffizienz  
Bahnhofstrasse 6, 5210 Windisch

**Projektleiter:**

Fabio Domenig

**Projektcoach:**

Dr. Petar Mandaliev  
Institut für Biomasse und Ressourceneffizienz  
FHNW Brugg-Windisch

**Projektnummer:**

EUT-P3-21HS-06

**Starttermin:**

24.09.2021

**Abgabe:**

17.12.2021

# Management Summary

- **Ausgangslage:**

Die Entwicklung unserer Gesellschaft geht Hand in Hand mit einer steigenden Abfallproduktion. Viele Länder setzen deshalb Kehrichtverbrennungsanlagen ein, welche nicht nur das Volumen des Kehrichts reduziert, sondern dabei auch Strom und Fernwärme produzieren. Was vom Abfall danach übrig bleibt ist KVA-Schlacke, welche nun ihrerseits die Deponien füllt. Um dem Platzmangel in den Deponien Herr zu werden, gibt es Bestrebungen, die Schlacke anderweitig unterzubringen und einen Nutzen aus ihr zu ziehen. Dazu zählen vor allem die Verwendung der Schlacke als Gesteinskörnung im Tief- und Strassenbau und ihre Verwendung in der Zement- und Betonherstellung, wobei in ersterer Anwendung anderen, chemisch unbelasteten Abfällen, wie zum Beispiel unverschmutztes Aushubmaterial, Vorrang gegeben wird. Dazu muss die Schlacke gewisse chemische und physische Voraussetzungen erfüllen. Diese werden zusammen mit den rechtlichen Grundlagen bezüglich der Verwendung von KVA-Schlacke in diesem Bericht untersucht. Besonderes Augenmerk wird dabei auf die Schadstoffgrenzwerte im Zusammenhang mit der Verwendung im Tief- und Strassenbau und in der Zement- und Betonherstellung gerichtet. KVA-Schlacke enthält noch viele Wertstoffe, wie unter anderem Eisen und Aluminium. Um diese Stoffe neben den herkömmlichen Trennmethode noch effizienter und vollständiger zu extrahieren, wird das SELFRAG-Verfahren angewendet. Dieses Verfahren reduziert das Volumen der Schlacke durch die Entfernung verschiedener Bestandteile noch weiter und verändert ihre stoffliche Zusammensetzung. Diese veränderte Restschlacke wird ebenfalls auf ihre Verwendungsmöglichkeiten untersucht.

- **Ziele:**

1. Welche Verwertungsmöglichkeiten der KVA-Schlacke in DE, AUT, NLD, CH gibt es?
2. Vergleich der rechtlichen Grundlagen zur Verwertung von KVA-Schlacke (EU/D/A/CH). Was sind die Begründungen der einzelnen Regelungen
3. Welche sind die wichtigen physikalischen und chemischen Parameter, die für eine Klinkerherstellung mit Rohmehl und Zuzugstoff notwendig sind?
4. Erfassen und Beschreibung der Stoffströme SELFRAG/KVA-Fribourg – Entwicklung eines Sankeydiagramms
5. Verfassen von Analysebericht und Poster

- **Vorgehen:**

Um die Ziele der Arbeit zu erfüllen, wurde eine umfangreiche Literatur- und Internetrecherche durchgeführt. Auch wurde die KVA Saidef in Fribourg besichtigt und Interviews mit Experten geführt.

- **Erkenntnisse:**

Es gibt hauptsächlich vier Verwendungsmöglichkeiten für KVA-Schlacke. Zum einen kann sie als Gesteinskörnung, wie Kies oder Sand im Tief- und Strassenbau eingesetzt werden. Auch kann die KVA-Schlacke aufgrund ihrer Fähigkeit zur puzzolanischen Reaktion als direkter Zementersatz in der Betonherstellung verwendet werden, in der sie auch die Rolle als Zuschlagstoff übernehmen kann. Zusätzlich eignet sie sich aufgrund ihrer Anteile an  $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  und  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  als Rohstoff in der Zementklinkerproduktion.

Das Austreten von Schwermetallen aus der KVA-Schlacke stellt generell ein grosses Problem dar. Diese liegen in der KVA-Schlacke in elementarer Form, als Legierung und gebunden in Phasen wie Gläser, Oxiden (z. B. Spinellen) und Silikaten (z. B. Pyroxene und Melitithe) vor. Diese beginnen nach kurzer Zeit zu korrodieren, was zur Mobilisierung der Schwermetalle führt. In einem geeigneten chemischen Milieu werden die Schwermetalle als Oxide, Hydroxide und Carbonate neu gebunden, was durch Sorption auf der Oberfläche der Festphase geschehen, oder zur Bildung neuer, sekundärer, mineralischer Phasen führen kann. Bei niedrigeren pH-Werten werden diese Verbindungen geschwächt, was den Abtransport der Schwermetalle durch Wasser begünstigt und so zur Kontaminierung der Umwelt führt. Die veränderte Mineralogie, zum Beispiel beim Kontakt mit Zement oder andere mineralische Phasen, kann die Schwermetallmobilisierung zusätzlich beeinflussen.

Wird die KVA-Schlacke als Rohstoff in der Zementklinkerproduktion verwendet, so werden die Schwermetalle der KVA-Schlacke in das Zementgitter eingebunden, wodurch das Austreten dieser Stoffe stark reduziert wird. Dem entsprechend eignet sich die KVA-Schlacke am besten für die Anwendung als Rohstoff in der Zementklinkerproduktion. Allerdings ist keine der untersuchten Restschlackefractionen ohne weiteres für die Verwendung in der Zement- und Betonherstellung in der Schweiz geeignet, da keine von ihnen alle rechtlichen Schadstoffgrenzwerte einhält. Denn im Gegensatz zu den restlichen untersuchten Ländern, hat die Schweiz eine Liste mit Schadstoffgrenzwerten definiert, welche der Abfall einhalten muss, um für die Verarbeitung in der Zement- und Betonherstellung zugelassen zu werden. Die anderen Länder haben lediglich Schadstoffgrenzwerte in Bezug auf Tief- und Strassenbau definiert. In der Schweiz ist laut der Verordnung über die Vermeidung und Entsorgung von Abfällen (VVEA) die Verwendung von KVA-Schlacke generell verboten.

- **Empfehlung:**

Die Weiterverwendung von KVA-Schlacke ist notwendig, um die Herausforderung des schwindenden Platzes in den Deponien zu meistern. Glücklicherweise bietet der grosse Bedarf an Zement und Beton eine gute Möglichkeit, die Massen an KVA-Schlacke sinnbringend zu verwenden und abseits von Deponien unterzubringen. Das SELFRAG-Verfahren stellt dabei einen Schritt in die richtige Richtung dar, indem das Gesamtvolumen der Schlacke reduziert und Rohstoffe rückgewonnen werden. Aus diesem Grund ist eine Ausweitung der SELFRAG-Technologie auf weitere KVAs wichtig. Zusätzlich muss jedoch ein Verfahren entwickelt werden, welches die grossen Mengen an KVA-Schlacke effizient von Schwermetallen säubern kann. Da das Austreten von Schwermetallen durch die Integration in ein Zementgitter stark reduziert wird, scheint die Verwendung von KVA-Schlacke als Rohstoff in der Klinkerproduktion am sinnvollsten. Dazu kommt, dass Untersuchungen in Italien und Taiwan ergeben haben, dass es ausreichen würde, 5 % der ungebrannten Zementklinkermasse durch KVA-Schlacke zu ersetzen, um sämtliche neu produzierte KVA-Schlacke zu verarbeiten und somit die weitere Auffüllung von Deponien zu stoppen. Um die KVA-Schlacke überhaupt verwenden zu können, müsste allerdings die VVEA entsprechend angepasst werden, da ihre Verwendung momentan illegal ist.

# Inhaltsverzeichnis

|       |                                                                |    |
|-------|----------------------------------------------------------------|----|
| 1.    | Einleitung.....                                                | 6  |
| 2.    | Rechtliche Grundlagen .....                                    | 7  |
| 2.1   | In der Schweiz: .....                                          | 7  |
| 2.2   | In Deutschland .....                                           | 9  |
| 2.3   | In Österreich.....                                             | 11 |
| 2.4   | In den Niederlanden .....                                      | 12 |
| 2.5   | Übersicht.....                                                 | 13 |
| 3.    | Funktion KVA und Trennungsanlage .....                         | 14 |
| 3.1   | Funktionsweise der KVA .....                                   | 14 |
| 3.2   | Funktionsweise der SELFRAG Trennungsanlage .....               | 17 |
| 3.3   | Fazit des Trennungsverfahrens.....                             | 19 |
| 4.    | Stoffflussanalyse.....                                         | 20 |
| 4.1   | Sankey-Diagramm der Stoffflüsse Saidef & SELFRAG .....         | 21 |
| 4.2   | Zusammensetzung Restschlacken .....                            | 23 |
| 4.3   | Rückgewinnung von Material .....                               | 27 |
| 4.4   | Fazit der Stoffflussanalyse .....                              | 28 |
| 5.    | Verwendung von KVA-Schlacke .....                              | 29 |
| 5.1   | Gesteinskörnung, wie Kies und Sand .....                       | 29 |
| 5.1.1 | Fazit zur Verwendung als Gesteinskörnung.....                  | 30 |
| 5.2   | Anwendung in der Zement- und Betonherstellung .....            | 30 |
| 5.2.1 | Zuschlagstoff in der Betonherstellung .....                    | 30 |
| 5.2.2 | Ersatzstoff für Zement in der Betonherstellung .....           | 31 |
| 5.2.3 | Nutzung als Rohstoff in der Zementklinkerproduktion .....      | 32 |
| 5.2.4 | Gesetzliche Grenzwerte und Stoffanteile der KVA-Schlacke ..... | 33 |
| 5.2.5 | Fazit Anwendung in der Zement- und Betonherstellung.....       | 33 |
| 6.    | Schlussfolgerung .....                                         | 37 |
| 6.1   | Zusammenfassung .....                                          | 37 |
| 6.2   | Empfehlung.....                                                | 39 |
| 7.    | Danksagung .....                                               | 40 |
| 8.    | Verzeichnisse.....                                             | 41 |
| 8.1   | Literaturverzeichnis .....                                     | 41 |
| 8.2   | Glossar.....                                                   | 44 |
| 8.3   | Abbildungsverzeichnis .....                                    | 45 |
| 8.4   | Tabellenverzeichnis.....                                       | 45 |

|     |                                |    |
|-----|--------------------------------|----|
| 9.  | Ehrlichkeitsvereinbarung ..... | 46 |
| 10. | Anhang .....                   | 47 |

# 1. Einleitung

Die Abfallverbrennung hat in der Schweiz eine lange Tradition. So wurde bereits 1904 in Zürich die erste Verbrennungsanlage eröffnet. Dies ist dem Umstand geschuldet, dass die Schweiz nicht unbegrenzt über Platz für Abfalldeponien verfügt. Heute, im Jahr 2021, hat die Schweiz, wie in Abbildung 1 zu sehen ist, insgesamt 30 Kehrichtverbrennungsanlagen (KVA) in Betrieb. [1]

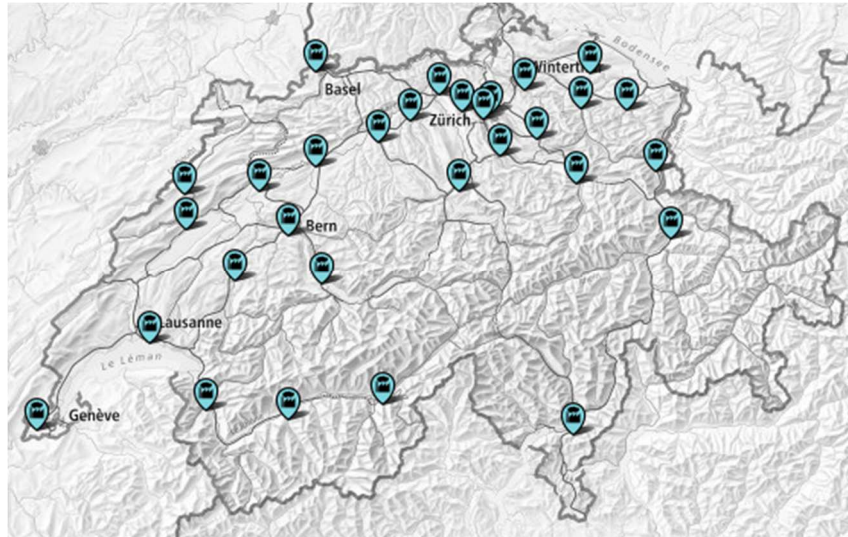


Abbildung 1: KVA-Standorte Schweiz [2]

Die Kehrichtverbrennung ist schweizweit der gesetzliche verankerte Standard zur Handhabung von Klärschlamm, brennbare Bauabfälle, Siedlungsabfälle und Abfällen ähnlicher Zusammensetzung [3]. Des Weiteren wird bei der Verbrennung von Abfall in den neueren Anlagen thermische Energie für Stromproduktion und Fernwärme gewonnen. Aus der Verbrennung resultieren neben den Abgasen die KVA-Schlacke und die Filterasche. Diese müssen, wegen dem Gehalt an Schwermetallen, anschliessend auf unbestimmte Zeit in Deponien entsorgt werden. Da Neueröffnungen von Deponien in der Bevölkerung einen schweren Stand haben und es in der Schweiz nicht viel Platz für neue Deponien gibt, entwickelte sich die Idee, neben der Rohstoffrückgewinnung von Metallen, Teile der Schlacke in der Herstellung von Zement und Beton im Sinne einer Kreislaufwirtschaft wieder zu verwenden.

Die vorliegende Arbeit untersucht deshalb die Wiederverwendbarkeit der KVA-Schlacke. Der Fokus wird dabei auf Schlackenfraktionen gelegt, die im Rahmen der Behandlung mittels des Trennverfahrens der Firma Selfrag AG entstehen[4]. Das Verfahren wird gewerbsmässig im Kanton Freiburg in der KVA Saïdef eingesetzt. Nach der Untersuchung wird eine Empfehlung abgegeben, ob sich nach dem Trennverfahren Teile der KVA-Schlacke als Gesteinskörnung im Tief- und Strassenbau, als Zuschlagstoff in der Betonherstellung, als Zementersatz oder als Rohstoff in der Zementklinkerherstellung eignen. Die Empfehlung wird aufgrund der chemischen sowie mineralischen Zusammensetzung und der in der Schweiz gesetzlich vorgegebenen Grenzwerte zur Verwendung von Abfällen in der Zement- und Betonherstellung abgegeben.

## 2. Rechtliche Grundlagen

Um eine mögliche Weiterverwendung der KVA-Schlacke nach dem SELFRAG-Verfahren im gesetzlich vorgegebenen Rahmen zu prüfen, werden in diesem Kapitel die rechtlichen Vorgaben für die Schweiz, Deutschland, Österreich und den Niederlanden untersucht und miteinander verglichen.

### 2.1 In der Schweiz:

In der Schweiz sind Grenzwerte zur Weiterverwendung von Abfällen in der Zement- und Betonherstellung geregelt. Sie werden in der Abfallverordnung SR 814.600 im Anhang 4 des Bundesrates vom 4. Dezember 2015 festgehalten.

#### § SR 814.600 Artikel 24 Anhang 4 1.1-1.6

##### Artikel 24

Abfälle dürfen als Rohmaterial, als Rohmehlkorrekturstoffe, als Brennstoffe oder als Zumahl- oder Zuschlagstoffe bei der Herstellung von Zement und Beton verwendet werden, wenn sie die Anforderungen nach Anhang 4 erfüllen. Als Rohmaterial oder als Brennstoffe dürfen jedoch keine gemischten Siedlungsabfälle und keine gemischt gesammelten und nachträglich sortierten Siedlungsabfälle verwendet werden. [3]

##### Anhang 4

**1.1** Abfälle dürfen als Rohmaterial bei der Herstellung von Zementklinker verwendet werden, wenn sie die nachfolgenden Grenzwerte (Gesamtgehalte) nicht überschreiten und der hergestellte Zementklinker die Anforderungen nach Ziffer 1.6 einhält [3]:

Tabelle 1: Grenzwerte für Abfall als Rohmaterial [3]

| Stoff                                               | Grenzwert mg/kg<br>T.M. * |
|-----------------------------------------------------|---------------------------|
| Antimon                                             | 30                        |
| Arsen                                               | 30                        |
| Blei                                                | 500                       |
| Cadmium                                             | 5                         |
| Chrom gesamt                                        | 500                       |
| Cobalt                                              | 250                       |
| Kupfer                                              | 500                       |
| Nickel                                              | 500                       |
| Quecksilber                                         | 1                         |
| Thallium                                            | 3                         |
| Zink                                                | 2,000                     |
| Zinn                                                | 100                       |
| Leichtflüchtige Chlorkohlenwasserstoffe (LCKW)      | 10                        |
| Polychlorierte Biphenyle (PCB)                      | 10                        |
| Aliphatische Kohlenwasserstoffe C5–C10              | 100                       |
| Aliphatische Kohlenwasserstoffe C10–C40             | 5 000                     |
| Monocyclische aromatische Kohlenwasserstoffe (BTEX) | 10                        |
| Benzol                                              | 1                         |
| Polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK)  | 250                       |

|                                        |        |
|----------------------------------------|--------|
| Benzo[a]pyren                          | 3      |
| Gesamter organischer Kohlenstoff (TOC) | 50,000 |

\*(T.M. steht für trocken Material)

**1.6** Der Schwermetallgehalt eines mit Abfällen hergestellten Zementklinkers darf die folgenden Grenzwerte (Gesamtgehalte) nicht überschreiten; ausgenommen ist eine Überschreitung, die nicht auf menschliche Tätigkeiten zurückzuführen ist [3]:

*Tabelle 2: Grenzwerte Schwermetall Zementklinker aus Abfällen [3]*

| Stoff      | Grenzwert in mg/kg |
|------------|--------------------|
| Antimon    | 15                 |
| Arsen      | 15                 |
| Blei       | 250                |
| Cadmium    | 5                  |
| Chrom ges. | 250                |
| Cobalt     | 125                |
| Kupfer     | 250                |
| Nickel     | 250                |
| Zink       | 750                |
| Zinn       | 50                 |

Laut der VVEA darf KVA-Schlacke nicht in der Zement- und Betonherstellung verwendet werden. [3]

## 2.2 In Deutschland

In Deutschland ist die KVA-Schlacke als Hausmüllverbrennungsasche (HMVA) bekannt. Die Festlegung spezifischer Richtwerte liegt in der Verantwortung der einzelnen Bundesländer. Dazu gab es eine Bund-/Länderarbeitsgemeinschaft Abfall, die ein Regelwerk dazu veröffentlichte. Die letzte Mitteilung war die LAGA M20, welche von Grenzwerten für Recyclingbaustoffe spricht. Die Müllverbrennungsasche wird in der Mitteilung nicht explizit behandelt [5]. Deshalb wird ab dem 1. August 2023 eine Mantelverordnung, eine nationale Verordnung für Ersatzbaustoffen, den Schutz von Gewässern und Böden regeln. Die Verordnung soll die Akzeptanz von Ersatzbaustoffen im Sinne einer Kreislaufwirtschaft fördern und für einen einheitlicheren Vollzug sorgen. In der Mantelverordnung finden sich neu Grenzwerte und Mindesteinbaumengen für die Verwendung von HMVA. Ein Auszug aus der Mantelverordnung [6]:

### § 20 Absatz 1-2 Zusätzliche Einbaubeschränkungen bei bestimmten Schlacken und Aschen

**Abs. 1** Die nachstehend genannten mineralischen Ersatzbaustoffe dürfen in technischen Bauwerken nur in Mindesteinbaumengen verwendet werden. Einzuhalten ist eine Mindesteinbaumenge [6]:

1. von mindestens 250 m<sup>3</sup> für  
Hausmüllverbrennungsasche der Klasse 2 – HMVA-2
2. von mindestens 50 m<sup>3</sup> für  
Hausmüllverbrennungsasche der Klasse 1 – HMVA-1

Sind diese mineralischen Ersatzbaustoffe Teil eines Gemisches, ist für jeden mineralischen Ersatzbaustoff die jeweilige Mindesteinbaumenge einzuhalten [6].

**Abs. 2** Die in Absatz 1 festgelegten Mindesteinbaumengen gelten nicht für Instandsetzungs- oder Ergänzungsmaßnahmen an technischen Bauwerken, wenn der jeweilige mineralische Ersatzbaustoff am Einbauort bereits verwendet wurde [6].

*Tabelle 3: Materialwerte für geregelte Ersatzbaustoffe ohne Gleisschotter, Bodenmaterial und Bagger-gut [6]*

| Stoff                     | Einheit | HMVA1  | HMVA2  |
|---------------------------|---------|--------|--------|
| pH-Wert                   |         | 7 – 13 | 7 – 13 |
| Elektrische Leitfähigkeit | µS/cm   | 2,000  | 12,500 |
| Chlorid                   | mg/l    | 160    | 5,000  |
| Sulfat                    | mg/l    | 820    | 3,000  |
| Antimon                   | µg/l    | 10     | 60     |
| Chrom, ges.               | µg/l    | 150    | 460    |
| Kupfer                    | µg/l    | 110    | 1,000  |
| Molybdän                  | µg/l    | 55     | 400    |
| Vanadium                  | µg/l    | 55     | 150    |

In der Mantelverordnung wird die Hausmüllverbrennungsasche in zwei Güteklassen eingeteilt. Die Einteilung geschieht nach den folgenden Kriterien:

*Tabelle 4: Kriterien Güteklasse HMVA 1-2 [7]*

| Stoff             | Dimension | HMVA 1 | HMVA 2 |
|-------------------|-----------|--------|--------|
| pH-Wert           |           | 7-13   | 7-13   |
| El. Leitfähigkeit | µS/cm     | 2,000  | 5,000  |
| Chlorid           | mg/l      | 50     | 250    |
| Sulfat            | mg/l      | 200    | 600    |
| Blei              | µg/l      | 50     | 50     |
| Cadmium           | µg/l      | 5      | 5      |
| Chrom VI          | µg/l      | 50     | 50     |
| Kupfer            | µg/l      | 300    | 300    |
| Quecksilber       | µg/l      | 1      | 1      |
| Zink              | µg/l      | 300    | 300    |

Es ist wichtig zu erwähnen, dass die gesetzlichen Grundlagen nicht für die Verwendung von HMVA in Zementklinker ausgelegt ist. In Deutschland wird die HMVA vorwiegend in den Strassen und Erdbau als Füllstoff eingesetzt. Dies erklärt auch die Angabe der Grenzwerte in der Mantelverordnung in Milligramm oder Mikrogramm pro Liter. Hier werden Eluatmessungen zur Bestimmung von Grenzwerten vorgenommen [6].

## 2.3 In Österreich

Auch in Österreich ist, wie in Deutschland, der Einsatz von KVA-Schlacke in der Zementindustrie nicht gesetzlich geregelt. Es findet sich aber eine Recycling-Baustoffverordnung, welche die Weiterverwendung von Abfällen regelt. Die Verordnung spricht vorwiegend von Bauabfällen. Die Weiterverwertung von KVA-Schlacke wird im Gesetzestext nicht explizit behandelt. Die Grenzwerte in der Verordnung geben aber die Anforderungen der Gesetzgebung an einen Recyclingstoff im Baubereich für das Land Österreich wieder [8].

Auszug aus der Bauverordnung, die seit dem 1. Januar 2015 in Kraft ist:

*Tabelle 5: Parameter und Grenzwerte für Gesteinskörnungen, die ausschliesslich zur Herstellung von Beton ab der Festigkeitsklasse C 12/15 oder für die Herstellung von Beton der Festigkeitsklasse C 8/10 ab der Expositionsklasse XC1 gemäss ÖNORM B 4710-1 verwendet werden [8]*

|                  |                     | Qualitätsklasse |
|------------------|---------------------|-----------------|
| Parameter        | Einheit             | H-B             |
| Eluat bei L/S 10 |                     |                 |
| pH-Wert          | mg/kg TM            | Bis 12,5        |
| Chrom ges.       | mg/kg TM            | 1,0             |
| Kupfer           | mg/kg TM            | 2,0             |
| Ammonium-N       | mg/kg TM            | 8,0             |
| Chlorid          | mg/kg TM            | 1,000           |
| Sulfat           | mg/kg TM            | 6,000           |
| TOC              | mg/kg TM            | 200             |
| Gesamtgehalt     |                     |                 |
| Blei             | mg/kg TM            | 150             |
| Chrom ges.       | mg/kg TM            | 90              |
| Kupfer           | mg/kg TM            | 90              |
| Nickel           | mg/kg TM            | 60              |
| Quecksilber      | mg/kg TM            | 0,70            |
| Zink             | mg/kg TM            | 450             |
| KW-Index         | mg/kg TM            | 200             |
| Σ16PAK (EPA)     | mg/kg TM            | 20              |
| Verunreinigung   |                     |                 |
| FL               | cm <sup>3</sup> /kg | ≤ 5             |
| Rg+X             | M-%                 | ≤ 1             |

In der Ökonorm B 4710-1 ist die Verwendungsklasse XC1 wie folgt definiert:

*Tabelle 6: Definition Expositionsklasse [9]*

|            |                           |                                                                                                          |
|------------|---------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>XC1</b> | Trocken oder ständig nass | Beton in Gebäuden (Wohn- und Bürobau) einschl. Küche, Bad, Waschküche. Fundamente ständig im Grundwasser |
|------------|---------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|

In der Tabelle 5 sehen wir, dass Beton, der mit Gesteinskörnungen aus Recyclingbaustoffen hergestellt wird, die Gewässerschutzrichtlinien einhalten muss. Nach Definition aus Tabelle 6 wird dieser Beton für Fundamente eingesetzt und kann dauerhaft mit Wasser in Kontakt kommen.

## 2.4 In den Niederlanden

In den Niederlanden werden die Grenzwerte für die Weiterverwendung von KVA-Schlacke im Strassen- und Erdbau im «Soil Quality Decree» geregelt. Sie ist seit dem 22.11.2007 in Kraft. Das Bodenqualitätsdekret garantiert eine eindeutige Politik für eine nachhaltige Bodenbewirtschaftung. Das neue Dekret strebt ein Gleichgewicht zwischen Menschen und Umwelt an und soll Raum für gesellschaftliche Entwicklungen schaffen. Sie zielt auch darauf ab, ein Gleichgewicht zwischen einer gesunden Lebensumwelt und der Nutzung des Bodens für verschiedene Zwecke zu erreichen. Es wird im Dekret nicht vom Einsatz von KVA-Schlacke in der Zement- und Betonherstellung gesprochen.

Grenzwerte aus dem Dekret:

*Tabelle 7: Emissionsanforderungen für anorganische Parameter [10]*

| Parameter   | IBC Baumaterialien<br>mg/kg T.M. |
|-------------|----------------------------------|
| Antimon     | 0.7                              |
| Arsen       | 2                                |
| Barium      | 100                              |
| Cadmium     | 0.06                             |
| Chrom       | 7                                |
| Kobalt      | 2.4                              |
| Kupfer      | 10                               |
| Quecksilber | 0.08                             |
| Blei        | 8.3                              |
| Molybdän    | 15                               |
| Nickel      | 2.1                              |
| Seelen      | 3                                |
| Zinn        | 2.3                              |
| Vanadium    | 20                               |
| Zink        | 14                               |
| Brom        | 34                               |
| Chlorid     | 8,800                            |
| Fluorid     | 1,500                            |
| Sulfate     | 20,000                           |

Das Dekret unterscheidet zwischen ungebunden und gebundenen Baumaterialien. Wenn KVA-Schlacke ungebunden eingesetzt wird, gilt sie in den Niederlanden als IBC-Baumaterial. IBC steht für Isolieren, beherrschen und kontrollieren. IBC-Baumaterialien müssen, wie gesetzlich vorgeschrieben, auf ihre Schadstoffemissionen überwacht werden. Für die Untersuchung in diesem Bericht werden deshalb die Grenzwerte für IBC-Baumaterialien im Einsatz im Strassen- und Tiefbau aus dem Dekret übernommen. [10]

## 2.5 Übersicht

Für eine bessere Übersicht werden die gefundenen Grenzwerte aus den untersuchten Ländern in der Tabelle 8 zusammengeführt. Die Schweiz ist nicht auf der Liste aufgeführt, weil die Verwendung von KVA-Schlacke nicht zugelassen ist.

*Tabelle 8: Zusammenfassung Grenzwerte DE, AUT und NLD*

| Parameter                 | Deutschland<br>(HMVA1) | Österreich<br>mg/kg TM | Niederlande<br>mg/kg TM |
|---------------------------|------------------------|------------------------|-------------------------|
| pH-Wert                   | 7 – 13                 | Bis 12,5               | -                       |
| Elektrische Leitfähigkeit | 2,000 S/m              | -                      | -                       |
| Ammonium-N                | -                      | 8                      | -                       |
| Antimon                   | 10 µg/l                | -                      | 0.7                     |
| Arsen                     | -                      | -                      | 2                       |
| Barium                    | -                      | -                      | 100                     |
| Blei                      | 50 µg/l                | 150                    | 8.3                     |
| Brom                      | -                      | -                      | 34                      |
| Cadmium                   | 5 µg/l                 | -                      | 0.06                    |
| Chlorid                   | 50 mg/l                | 1,000                  | 8,800                   |
| Chrom, ges.               | 50 µg/l                | 1                      | 7                       |
| Fluorid                   | -                      | -                      | 1,500                   |
| Kobalt                    | -                      | -                      | 2.4                     |
| Kupfer                    | 300 µg/l               | 2                      | 10                      |
| Molybdän                  | 55 µg/l                | -                      | 15                      |
| Nickel                    | -                      | 60                     | 2.1                     |
| Quecksilber               | -                      | 0.7                    | 0.08                    |
| Selen                     | -                      | -                      | 3                       |
| Sulfat                    | 200 mg/l               | 6,000                  | 20,000                  |
| Thallium                  | -                      | -                      | -                       |
| TOC                       | -                      | 200                    | -                       |
| Vanadium                  | 55 µg/l                | -                      | 20                      |
| Zink                      | 300 µg/l               | 450                    | 14                      |
| Zinn                      | -                      | -                      | 2.3                     |

In der Tabelle 8 sieht man, dass in Deutschland Grenzwerte für Eluate angegeben werden, während im Rest der Länder die Grenzwerte für Trockenmaterial (TM) angegeben sind.

Im Unterkapitel 5.2.4 werden die Grenzwerte aus Tabelle 1 der VVEA verwendet. Dies, obwohl die KVA-Schlacke nach VVEA nicht als Rohmaterial verwendet werden darf.

## 3. Funktion KVA und Trennungsanlage

Damit bestimmt werden kann, für welche Verwendungszwecke die KVA-Schlacke eingesetzt werden kann. Werden in diesem Kapitel die Funktionsweise der KVA Saidef und das Trennungsverfahren der SELFrag AG untersucht. Die Stoffflüsse werden anschliessend in einem Sankey-Diagramm dargestellt und die Zusammensetzung der Restschlacke in einer Tabelle aufgeführt.

### 3.1 Funktionsweise der KVA

Nachdem der Abfall in der KVA angekommen ist, wird er als Erstes in einem Abfallbunker zwischengelagert. Der Kehricht wird danach direkt mit einem hydraulischen Mehrschalengreifer in die beiden Verbrennungsöfen geführt. Diese sind so konstruiert, dass ein Gefälle vorhanden ist, wodurch die Schlacke durch die Schwerkraft kontinuierlich nach unten über einen Rost geführt wird. [11]



*Abbildung 2: Der hydraulische Mehrschalengreifer greift nach Abfällen aus dem Abfallbunker*



*Abbildung 3: Blick in einen Verbrennungsofen*

Die Metallrückgewinnung der KVA Anlage basiert im Prinzip auf einem dreistufigen Prozess. Dieser besteht aus Freisetzung, Separierung und Sortierung. Direkt nach der Verbrennung der Abfälle, wenn die Rohschlacke aus dem Offen kommt, werden grosse Teile über 50 cm durch einen Sensor automatisch aussortiert. [11]



*Abbildung 4: Automatisch aussortierte Schlacke stücke grösser als 50 cm*

Danach wird die Schlacke über ein Förderband zum ersten Überbandmagneten geführt. Mit diesem werden mithilfe eines Magneten die magnetischen Metalle (FE) von den nicht magnetischen Metallen (NE) getrennt. Die magnetischen Metalle werden danach direkt zu einer Eisenmulde geleitet und für den Weitertransport gelagert. Teile mit der Grösse von 20 bis 50 cm werden ausgesiebt und auf die Restmaterialdeponie transportiert. Nichtmagnetische Schlacketeile, welche 0 bis 20 cm gross sind, werden zu einer Siebmaschine geführt. Teile mit einer Grösse von 0 bis 2 mm werden direkt ausgesiebt und auf eine Restschlacke Deponie geführt. Teile, welche 4 bis 20 cm gross sind, werden in FE, NE und Restmaterial aufgeteilt und danach entsprechend deponiert. Für die Abtrennung der FE haltigen Schlacke wird wieder ein Überbandmagnet verwendet. Die NE haltige Schlacke wird mit der Hilfe eines Nichteisenmetallschneiders getrennt und auf die NE Deponie befördert. Dieses Verfahren beruht darauf, dass durch starke Magnete ein kurzfristiger Wirbelstrom erzeugt wird, welcher ein der NE-haltigen Schlacke gegen gerichtetes Magnetfeld erzeugt, welches einen Abstossungseffekt zur Folge hat. [12], [11]



Abbildung 5: Die NE-haltige Schlacke wird abgetrennt.

### 3.2 Funktionsweise der SELFRAG Trennungsanlage

Die Anteile der Grösse 2 mm bis 4 cm werden durch Flotation in Wasser von Plastik und anderen anorganischen Komponenten geringer Dichte getrennt und anschliessend zu der Anlage von SELFRAG geführt. Für die Freisetzung der Metalle aus dieser Körnung wird eine spezielle Technologie von SELFRAG eingesetzt, welche mithilfe eines Hochspannungsimpuls die Schlacke an den Korngrenzen fragmentiert. Die Technologie wird «elektrodynamische Fragmentierung» genannt. Dabei wird 20-mal pro Sekunde eine Feldüberhöhung von 200,000 V erzeugt. Ein spezielles Detail ist, dass für diesen Vorgang Wasser als Isolator genutzt wird. Normalerweise ist Wasser selbst ein elektrischer Leiter. Aber da die Durchschlagsfestigkeit von Wasser grösser ist als die des Materials in der Schlacke und ein Durchschlag nur den Bruchteil einer Sekunde dauert, verläuft der elektrische Impuls durch das Material selbst. Dabei verläuft diese Entladung entlang der Korngrenzen, da hier der geringste Widerstand herrscht. Sobald es einen Durchschlag zwischen den beiden Elektroden gibt, bildet sich ein Plasmakanal, dieser führt zu einer Elektroexplosion im Festkörper mit einer Druckwelle, welche anschliessend die Materialien trennt. Der grosse Vorteil dieser Freisetzungsmethode ist eine phasenreine Trennung, welche beim Brechen und Mahlen des Materials nicht möglich wäre. [13]

Die Saidef ist Stand heute (Dezember 2021) die einzige KVA in der Welt, welche diese Technologie von SELFRAG anwendet, um die Schlacke mit einer Korngrösse von 2 bis 40 mm in die einzelnen Komponenten zu zerlegen. Ein weiterer grosser Vorteil ist, dass die Schlacke dadurch berührungsfrei getrennt werden kann. Danach wird die Schlacke mit einer Grösse von 3 bis 4 mm aufgeteilt in NE, Inert, FE und Restschlacke. Glas und Keramik, welche zu der inerten Fraktion gehören, werden dabei optisch erkannt und mit Hochdruckdüsen aussortiert. Die übriggebliebenen Restschlackenfraktionen werden am Ende auf eine Deponie vom Typ D geführt.

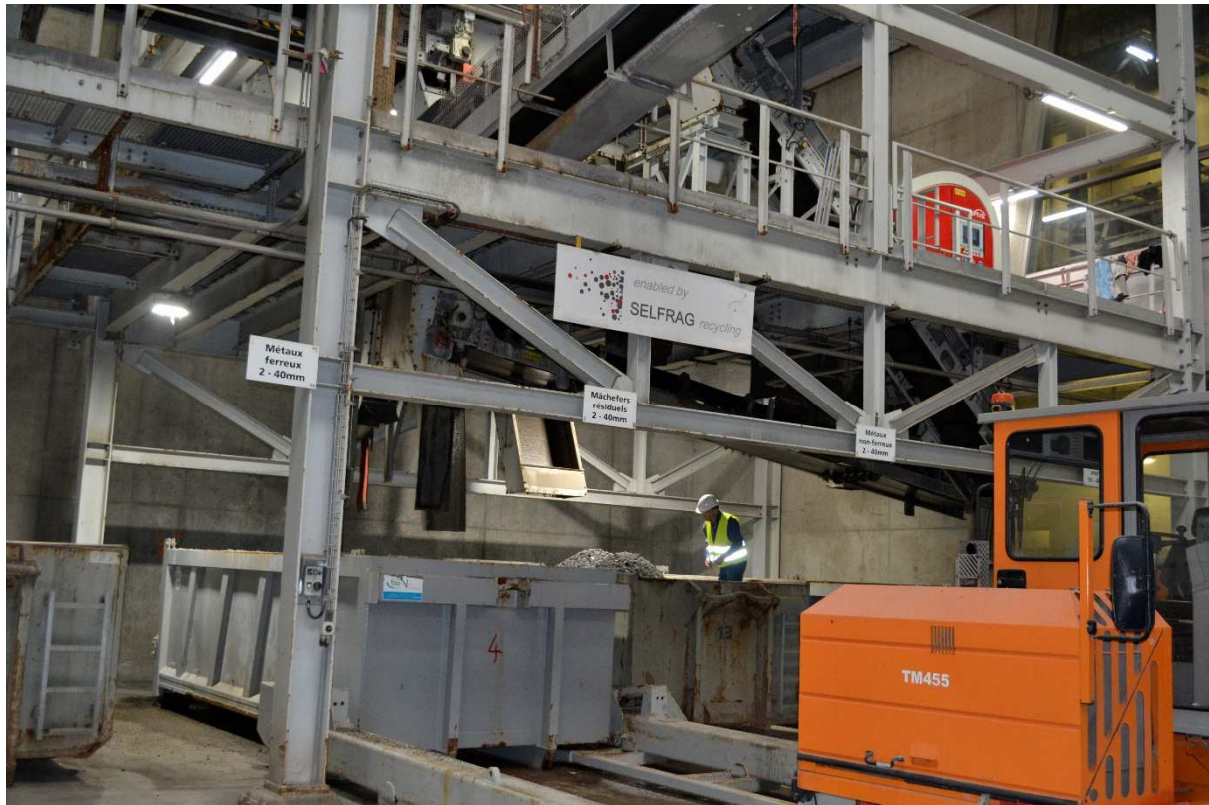


Abbildung 6: Aufteilung der Schlacke in die FE, NE, Inert und Reste

Neben Teilen der Rohschlacke werden auch die heissen Abgase des VerbrennungsOfens verwertet. Sie werden zuerst durch einen Elektrofilter geführt. Dieser separiert die Rauchgase vom Feinstaub mithilfe einer hohen elektrischen Spannung zwischen Metallplatten. Der Feinstaub wird dadurch elektrostatisch angezogen und kann abgeführt und deponiert werden. Danach gelangen die Rauchgase in die Waschanlage, welche sehr kleine Staubpartikel und Metaldämpfe auswäscht. Dieses sehr saure Wasser muss in einem nächsten Schritt dann auch noch durch Filtration, Absetzung und Neutralisation gesäubert werden, bevor es zur ARA gelangen kann. Das nun gewaschene Gas, welches Reingas genannt wird, enthält jedoch immer noch Stickoxide (NO<sub>x</sub>), welches mit der Hilfe von Ammoniakwasser und Katalysatoren in Wasser und Stickstoff umgewandelt wird. [14]

Beim Prozess des Abkühlens wird Wärme durch einen Wärmetauscher entzogen und durch ein Fernwärmenetz in die anliegenden Gebiete geführt, wo sie zum Heizen verwendet werden kann. Die nun abgekühlte Luft wird, bevor sie wie oben beschrieben gesäubert wird, durch eine Turbine geleitet. Dabei wird mit der Abwärme Wasser zu Dampf erhitzt und danach in eine Dampfturbine geleitet, welche dann Strom erzeugt und in das Stromnetz einspeist. Die dabei produzierte Strommenge übertrifft den Wert der Metallrückgewinnung und spielt dadurch für Saidef eine entscheidende finanzielle Rolle neben der Fernwärme. Mit dem gewonnenen Strom kann auch die Anlage selbst in Betrieb gehalten werden. [13], [14]

Bei der Verbrennung des Abfalls im Ofen werden in erster Linie organische Stoffe und Kohlenstoffverbindungen verbrannt. Übrig bleiben vor allem Oxid-Verbindungen wie SiO<sub>2</sub>, CaO, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SO<sub>3</sub>, Na<sub>2</sub>O, MgO, TiO<sub>2</sub>, K<sub>2</sub>O, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, MnO sowie H<sub>2</sub>O und CO<sub>2</sub>. Dabei spielt jedoch vor allem die Metallrückgewinnung eine wichtige Rolle. Die Metalle werden in Eisen (FE), Nichteisen (NE) und nichtmagnetische Edelstähle (VA) unterteilt. Dazu kommen noch einige Elemente dazu, wobei TOC, Cl, Ba, Cu, Zn, Pb und Cr den Hauptanteil davon ausmachen.

Um wahrheitsgetreue Proben für die Analyse der chemischen Zusammensetzung der Schlacke zu erstellen, wird die Fraktion unter 40 mm von der Fraktion darüber unterschiedlich präpariert. Die Fraktion von Körnung, welche kleiner als 2 mm ist, wurde nicht auf ihren Restmetallgehalt geprüft. Für die genauen Informationen dazu, kann im Schlussbericht der Saidef mehr darüber gelesen werden. Dort werden die Beprobung und die Aufbereitung im Detail besprochen. Auch werden die Restmetallgehalte jeder Fraktion, welche beprobt wurde, aufgezeigt. [11]

### **3.3 Fazit des Trennungsverfahrens**

Die Abfälle werden mit der Anlage von Saidef freigesetzt, separiert und sortiert. Das Überkorn (>40 mm) und das Unterkorn (<2 mm) werden aussortiert und deponiert. Die Korngrößen von 2 mm bis 200 mm werden von der SELFRAG-Anlage elektrodynamisch fragmentiert und dadurch an den Korngrenzen gespalten. Für das Aussortieren der magnetischen Metalle (FE) werden Überbandmagnete benutzt. Für die nicht magnetischen Metalle (NE) werden Wirbelstromscheider gebraucht. Für das Aussondern der inerten Schlacke (Glas, Keramik) werden Zeitlupen Kameras in Kombination mit Hochdruckdüsen verwendet.

In der KVA werden die Abgase in einem mehrstufigen Prozess von Feinstaub und Metaldämpfen gesäubert, gewaschen und katalysiert. Mit der Abwärme der Verbrennung wird eine Turbine angetrieben, die Strom erzeugt. Die Restwärme wird in ein Fernwärme-System eingespeist.

## 4. Stoffflussanalyse

Für die grafische Darstellung der Stoffströme wurde die Software STAN, was die Abkürzung für «sub-STance flow ANalysis» ist, benutzt. Dieses kostenlose Tool basiert auf dem österreichischen Standard «ÖNORM S 2096». Mit ihr können Sankey-Diagramme erstellt und Materialflussanalysen (MFA) durchgeführt werden. Die Daten für die MFA wurden aus dem Schlussbericht der Saidef entnommen und danach in eine Exceltabelle eingefügt. Aus dem Anhang des Schlussberichtes «Anhang A: Schema der Metallrückgewinnungsanlage» können die Mengen in Tonnen pro Stunde (t/h) und die jeweiligen Richtungen der einzelnen Ströme ausgelesen werden. Die einzelnen Deponien werden in Tonnen pro Jahr (t/a) angegeben.[15], [16]

## 4.1 Sankey-Diagramm der Stoffflüsse Saidef & SELFRAG

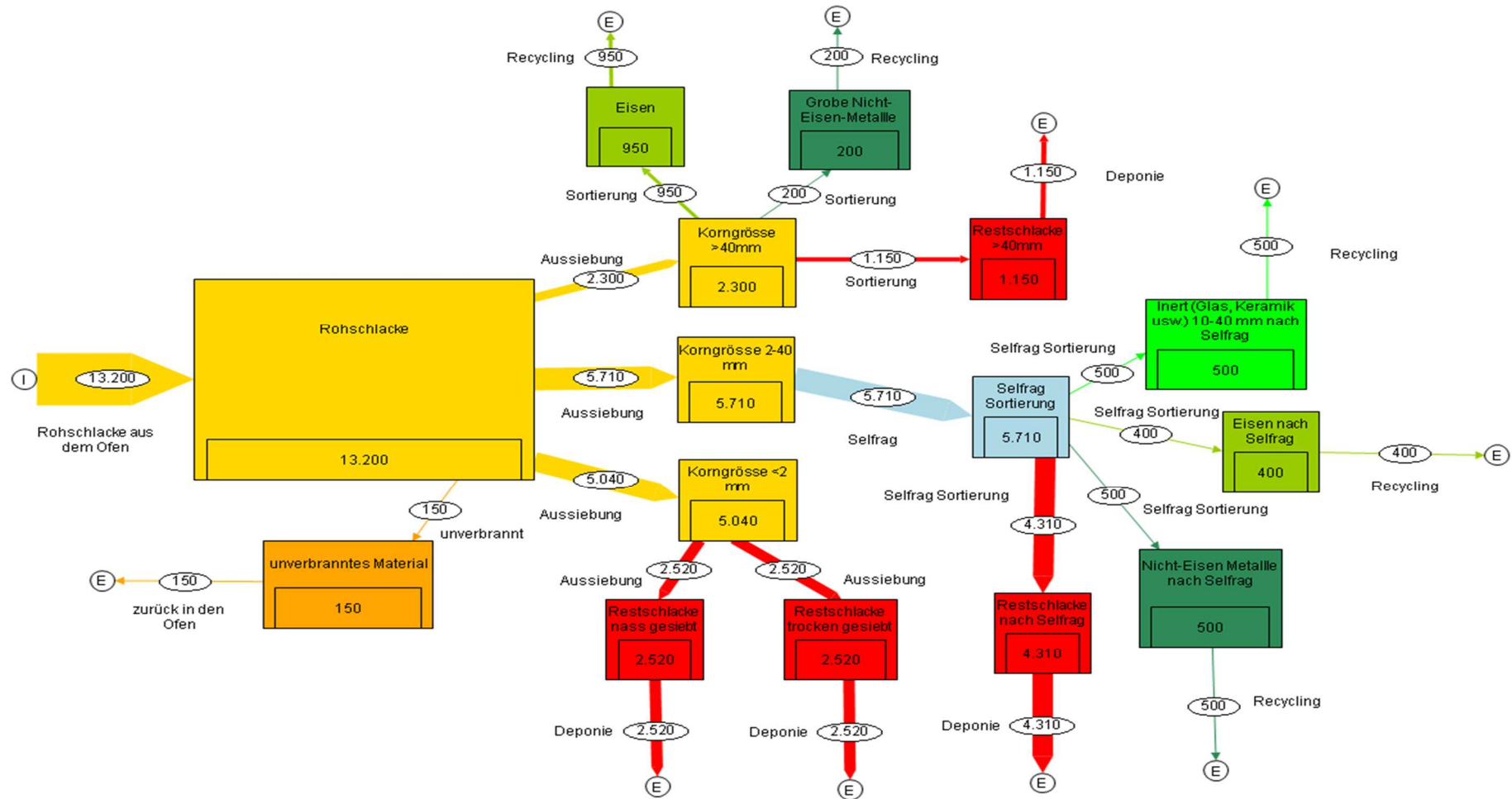


Abbildung 7: Sankey-Diagramm Saidef & SELFRAG [11]

Die obige Abbildung zeigt eine schematische Darstellung der Stoffströme innerhalb der Kehrrechtverbrennungsanlage Saidef AG mit der integrierter Sortieranlage der SELFRAG AG. Das Schema wurde mithilfe der vorher erklärten Software STAN erstellt, welche von der Universität Wien grosszügigerweise kostenlos zur Verfügung gestellt wird. Alle Zahlen haben die Einheit Tonnen pro Jahr (t/a) und basieren auf dem Schlussbericht Saidef 2019 der Universität Bern. Das «I» ganz links steht für Import, die «E»s stehen für Export, STAN nutzt diese Bezeichnungen zur Abgrenzung eines Systems. Die Systemgrenze bezieht sich in diesem Falle auf die Verarbeitung der Rohschlacke innerhalb der KVA, inklusive der SELFRAG Anlage. Die Rohschlacke wird also in das System "importiert", sobald sie aus dem Ofen kommt und aus dem System "exportiert", sobald sie die KVA als Restschlacke oder recycelbares Material verlässt. [11], [15], [16]

Jährlich kommen rund 13,200 t an Rohschlacke (gelb) aus den beiden Öfen der KVA. Gleich nach dem Austritt der Rohschlacke aus dem Ofen werden unverbrannte und übergrösse Teile aussortiert. Dabei handelt es sich meistens um grosse Metallteile mit einem hohen Schmelzpunkt. Diese werden automatisch vom Förderband getragen und danach von Hand aussortiert. Danach werden diese Metallteile wieder dem Ofen zugeführt. Dabei handelt es sich pro Jahr um rund 150 t Material (orange). Die restliche Rohschlacke wird in einem ersten Schritt nach Korngrösse ausgesiebt. Dabei entstehen die Fraktionen < 2 mm (ca. 5,040 t/a), 10-40 mm (ca. 5,710 t/a) und > 40 mm (ca. 2,300 t/a). [15]

Die Fraktion Überkorn (> 40 mm) wird von Saidef in einem eigenen Verfahren sortiert und verwertet. Dabei können rund 950 t Eisen (grün) und ca. 200 t Nichteisenmetalle (dunkelgrün) zurückgewonnen werden. Diese werden anschliessend dem Recycling zugeführt. Die restliche 1,150 t an Material werden als Restschlacke (rot) auf eine Deponie gebracht. [15]

Die Fraktion 2-40 mm wird der in den Prozess integrierten SELFRAG-Anlage zugeführt. Diese holt in einem mehrstufigen Verfahren (blau) verschiedene Materialien aus der Schlacke. Dabei kommen unter anderem elektrodynamische Fragmentation und Wirbelstromscheider zum Einsatz. Die SELFRAG-Anlage kann damit ca. 400 t Eisen (grün), ca. 500 t Nicht-Eisenmetalle (dunkelgrün) und ca. 500 t sogenannte Inert-Materialien (Glas, Keramik usw., hellgrün) aus der Schlacke sortieren. Diese werden separat gesammelt und dem Recycling zugeführt. Die übrigen 4,310 t Schlacke landen wiederum als Restschlacke (rot) auf der Deponie.

Die Fraktion Unterkorn (<2 mm) wird weder von Saidef selbst noch von SELFRAG verwertet, da die Korngrösse für die Normen der Metallrückgewinnung gemäss VVEA nicht mehr relevant ist. Entsprechend wird diese Fraktion nur noch ausgewaschen und gesiebt. Anschliessend landen sämtliche 5,040 t als Restschlacke (rot) auf einer Deponie. [11]

## 4.2 Zusammensetzung Restschlacken

### Restmetalle:

Tabelle 9: Restmetallgehalt nach Fraktion [11]

| Fraktion      | Menge  | Anteil |      | Metalle | FE     | NE     | VA     | Metalle gewichtet | FE gewichtet | NE gewichtet | VA gewichtet |
|---------------|--------|--------|------|---------|--------|--------|--------|-------------------|--------------|--------------|--------------|
| Einheit       | t/Jahr | gew. % |      | gew. %  | gew. % | gew. % | gew. % | gew. %            | gew. %       | gew. %       | gew. %       |
| >40 mm        | 1'150  | 11.0   | -    | 11.7    | 7.0    | 3.0    | 1.7    | 1.3               | 0.8          | 0.3          | 0.2          |
| 10-40 mm      | 991    | 9.4    | -    | 2.5     | 0.5    | 1.9    | 0.1    | 0.2               | 0.0          | 0.2          | 0.0          |
| 2-10 mm       | 2'500  | 23.8   | -    | 1.7     | 0.9    | 0.7    | 0.1    | 0.4               | 0.2          | 0.2          | 0.0          |
| <2 mm Selfrag | 819    | 7.8    |      |         |        |        |        |                   |              |              |              |
| <2 mm trocken | 2'520  | 24.0   | 55.8 | 0.0     | 0.0    | 0.0    | 0.0    | 0.0               | 0.0          | 0.0          | 0.0          |
| <2 mm nass    | 2'520  | 24.0   |      |         |        |        |        |                   |              |              |              |
| Total         | 10'500 | 100    | -    | -       | -      | -      | -      | 1.9               | 1.0          | 0.7          | 0.2          |

Der Restmetallgehalt wurde für die Fraktion >40 mm sowie alle Fraktionen 2-40 mm nach der Metallrückgewinnung bestimmt. Für die Körnung >2 mm wurde der Restmetallgehalt nicht bestimmt, da diese gesetzlich nicht weiter relevant ist. Die Fraktion >40 mm weist mit einem Gewichtsanteil von 11.7 % einen hohen Metallgehalt auf, welcher sich gemäss Tabelle 9 vor allem aus Eisen zusammensetzt. Saidef hat basierend auf dieser Erkenntnis die Massnahme getroffen, dass sie die Fraktion >40 mm nach der Aussortierung noch mal in den Ofen leitet und ein zweites Mal verbrennt, wodurch diese zerkleinert wird und in die Fraktion <40 mm übergeht. In den verschiedenen Fraktionen 2 - 40 mm funktioniert die Metallrückgewinnung gut und des Gewichts% von NE, FE und VA fallen entsprechend klein aus. Auf die gesamte Restschlacke gewichtet betragen die Anteile 1 % (FE), 0,7 % (NE) und 0.2 % (VA). Damit erfüllen alle Restschlacke-Fraktionen die gesetzliche Anforderung, dass der Restmetallgehalt von NE-Metallen 1 % nicht überschreiten darf. [11]

## Hauptchemie:

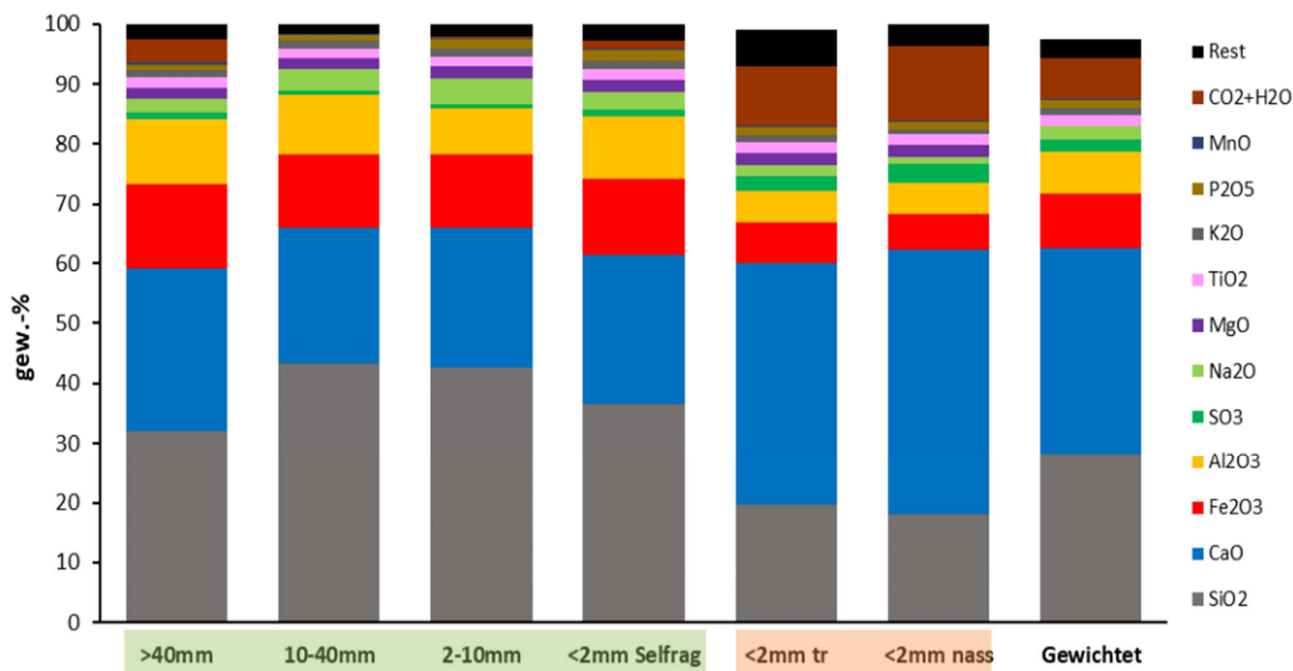


Abbildung 8: Grafische Darstellung der chemischen Bestandteile der Restschlacke [11]

Für die Untersuchung wurden die Fraktionen in 2 Gruppen geteilt, Gruppe 1 (grün) mit allen Fraktionen von 2 bis > 40 mm sowie der Fraktion <2 mm, die durch das SELFRAG-Verfahren entsteht, und die Gruppe 2 (orange) mit den beiden Fraktionen <2mm tr und <2mm nass. Dabei liegt der Unterschied darin, dass die Fraktionen der Gruppe 2 vor der Metallrückgewinnung aussortiert werden, während die Fraktionen der Gruppe 1 das SELFRAG-Verfahren durchlaufen. [11]

Gruppe 1 macht 52 % der Masse der gesamten Restschlacke aus und weist mehr Durchläufer wie Gestein und Keramik auf, wodurch diese Fraktionen einen höheren Gehalt an verschiedenen Oxiden wie SiO<sub>2</sub> oder Fe<sub>3</sub>O<sub>3</sub> hat. Die Fraktionen der Gruppe 2 bestehen vor allem aus Asche, Sulfaten und Karbonaten, was sich zum Beispiel an den deutlich höheren Anteilen von CO<sub>2</sub> und SO<sub>3</sub> zeigt.

Betrachtet man die Restschlacke auf ein Mittel gewichtet, machen SiO<sub>2</sub> (35 %) und CaO (30 %) mit Abstand den grössten Anteil aus, gefolgt von weiteren Oxiden wie Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. CO<sub>2</sub> und H<sub>2</sub>O. Die chemische Zusammensetzung ist immer auch eine Widerspiegelung der Zusammensetzung der ursprünglichen Abfälle. So hat z.B. der Anteil an SiO<sub>2</sub> im Vergleich zu früheren Studien abgenommen. [11]

### Spurenchemie:

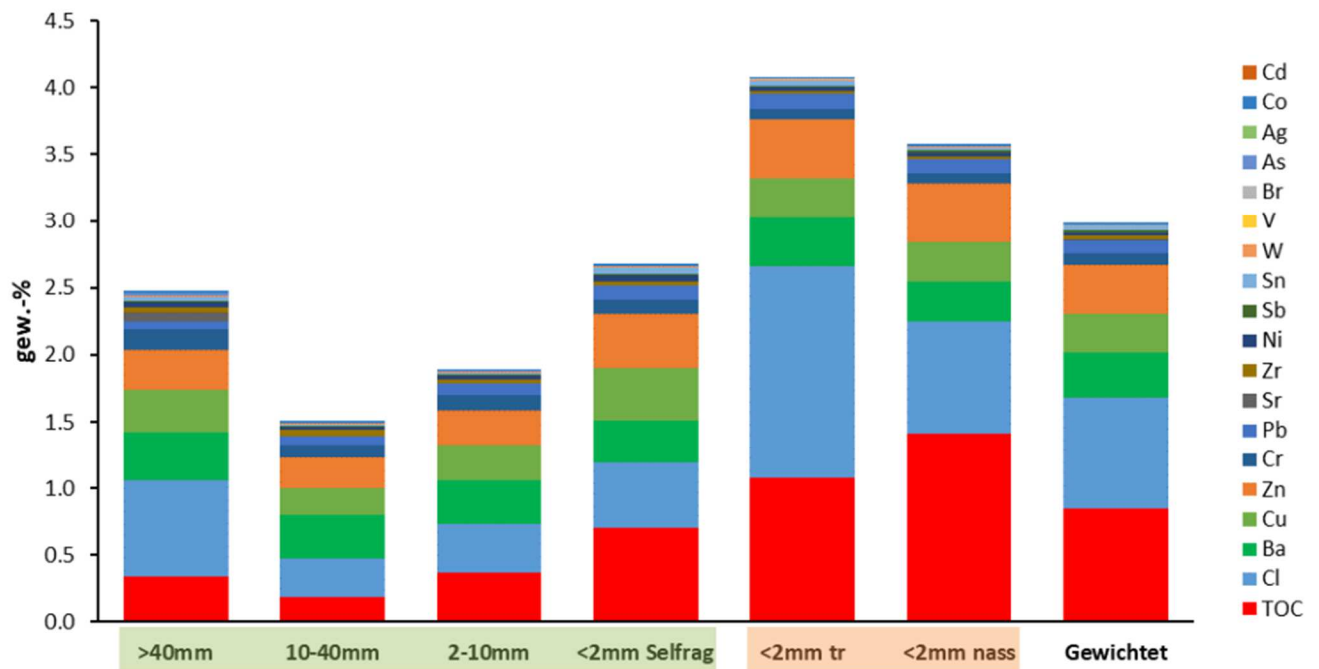


Abbildung 9: Grafische Darstellung der Spurenchemie-Elemente in den verschiedenen Fraktionen [11]

Die Elemente der Spurenchemie wurden wiederum für die beiden Gruppen untersucht und geben die Elemente wieder, die in der vorherigen Grafik unter Rest geführt wurden und einen Anteil im einstelligen % Bereich aufweisen. Für die Spurenelemente lässt sich vor allem sagen, dass für den TOC Gehalt und Elemente wie Chlor (Cl), Zink (Zn) und Chrom (Cr) eine deutlich ersichtliche Korngrößenabhängigkeit vorliegt, während andere Elemente wie Barium (Ba), Kupfer (Cu) und Blei (Pb) über alle Fraktionen hinweg konstant vorkommen. Auf diese für die Verwertung der Schlacke sehr relevante Tatsache wird in Kapitel 2.3 noch genauer eingegangen. [11]

## Mineralien:

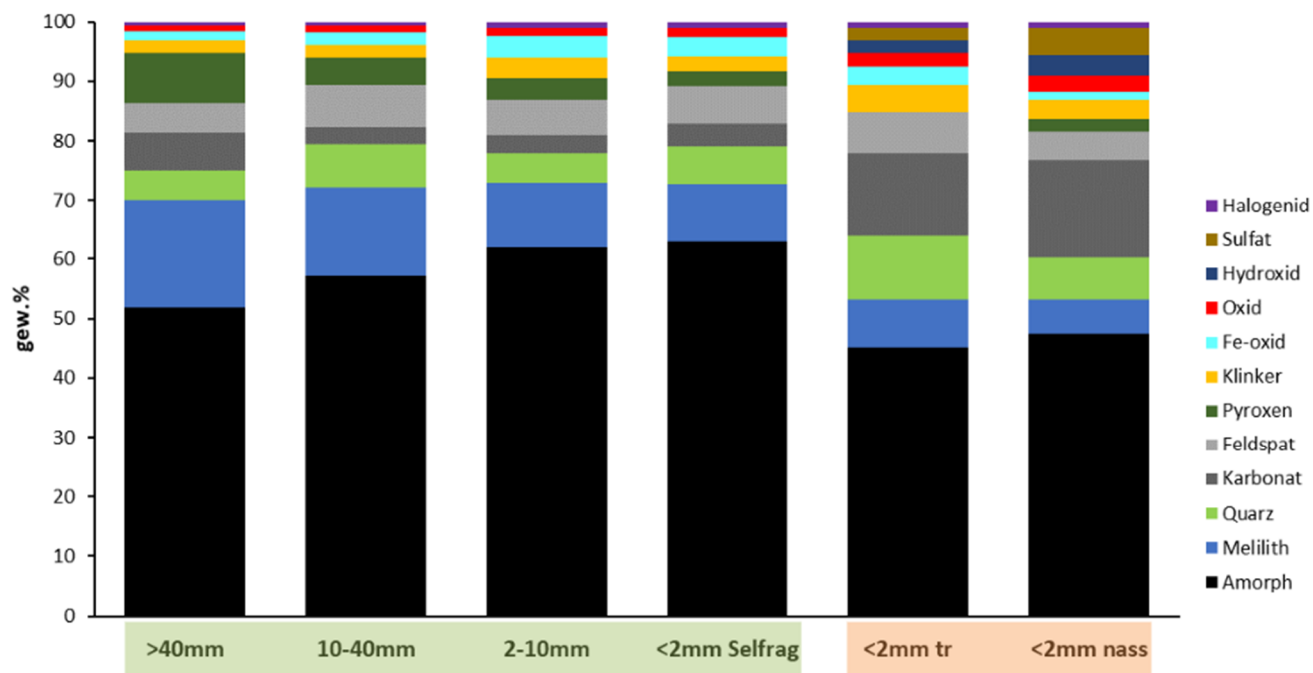


Abbildung 10: Grafische Darstellung der in der Restschlacken enthaltenen Mineralien [11]

Die mineralische Zusammensetzung der Restschlacke kann Aufschluss darüber geben, in welcher Form die Elemente vorliegen und in welchen Mineralien sie sich konzentrieren. Daraus lassen sich Rückschlüsse über das Verhalten und die Verfügbarkeit der einzelnen Elemente der Restschlacke in der Umwelt ziehen. Alle Fraktionen weisen einen hohen amorphen Anteil von 45 bis 63 % der Masse auf, welcher sich neben erstarrter Schmelze auch aus Glas zusammensetzt, welches durch die verschiedenen Rückgewinnungsprozesse hindurchgekommen ist. Die Korngrößenabhängigkeit zeigt sich hier vor allem im amorphen Anteil und in der kristallinen Phase. Zudem weisen die Fraktionen, die eine ähnliche chemische Zusammensetzung haben, analog dazu auch eine ähnliche mineralische Zusammensetzung auf. [11]

Als Durchläufermineralien finden sich vor allem Quarz (höherer Anteil in Gruppe 2), Feldspat (überall etwa konstant) und Pyroxen (höherer Anteil in Gruppe 1) wieder. Unter den neugebildeten Mineralien finden sich Melilith (starke Korngrößenabhängigkeit), Klinker (höherer Anteil in Gruppe 2), Fe-Oxide (in allen Fraktionen etwa konstant) und weitere Oxide (feinkörnige Fraktionen haben tendenziell mehr Anteile). Hydratisierte Mineralien kommen nur in Gruppe 2 in Form von Hydroxiden vor, wobei die nass abgesiebte Fraktion etwa doppelt so viel Gehalt hat. Bei den Salzen liegen vor allem Sulfate vor (kommen wie Hydroxide nur in Gruppe 2 vor und doppelt so oft in der nassen Fraktion). Halogenide kommen in allen Fraktionen im Bereich von ca. 1 % vor. Möglicherweise handelt es sich um die aus dem übriggebliebenen Prozesswasser ausgefällten Salze.

Karbonate kommen sowohl als Durchläufer als auch als neugebildete Mineralien vor. Der Kohlenstoffgehalt von Gruppe 2 ist etwas höher, was mit dem höheren CaO Anteil in der chemischen Zusammensetzung übereinstimmt.

## 4.3 Rückgewinnung von Material

Tabelle 10: Vergleich der Rückgewinnung

|                                       |        |           |                |
|---------------------------------------|--------|-----------|----------------|
| Rückgewinn insgesamt                  |        |           |                |
| Fraktion                              | Menge  | Anteil    |                |
| Einheit                               | t/a    | Gewichts% | Material       |
| initiale Rohschlacke                  | 13,200 | 100       | Rohschlacke    |
| Überkorn (>40 mm)                     | 1,150  | 8.7       | Restschlacke   |
| Fe-Schrott                            | 950    | 7.2       | Produkt        |
| Grobe NE-Fraktion                     | 200    | 1.5       | Produkt        |
| Unverbranntes Material                | 150    | 1.1       | zurück in Ofen |
| Feinschlacke (<2mm) trocken abgesiebt | 2,520  | 19.1      | Restschlacke   |
| Feinschlacke (<2mm) nass abgesiebt    | 2,520  | 19.1      | Restschlacke   |
| Restschlacke 2-40 mm nach SELFRAG     | 4,310  | 32.7      | Restschlacke   |
| Inert nach SELFRAG                    | 500    | 3.8       | Produkt        |
| FE nach SELFRAG                       | 400    | 3         | Produkt        |
| NE nach SELFRAG                       | 500    | 3.8       | Produkt        |
|                                       |        |           |                |
| Rückgewinn Überkorn                   | t/a    | Gewichts% | Material       |
| Fraktion Überkorn                     | 2,300  | 100.0     | Rohschlacke    |
| Eisen                                 | 950    | 41.3      | Produkt        |
| Nichteisen                            | 200    | 8.7       | Produkt        |
| Restschlacke Überkorb                 | 1,150  | 50.0      | Restschlacke   |
|                                       |        |           |                |
| Rückgewinn SELFRAG                    | t/a    | Gewichts% | Material       |
| Fraktion 2-40 mm                      | 5,710  | 100.0     | Rohschlacke    |
| FE nach SELFRAG                       | 400    | 7.0       | Produkt        |
| NE nach SELFRAG                       | 500    | 8.8       | Produkt        |
| Inert nach SELFRAG                    | 500    | 8.8       | Produkt        |
| Restschlacke SELFRAG                  | 4,310  | 75.5      | Restschlacke   |

Die obige **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** zeigt einen Vergleich der Rückgewinnungsrate der einzelnen Materialien in Gewichtsprozent, einmal gesamthaft, einmal auf die Fraktion Überkorn sowie einmal auf SELFRAG bezogen.

Insgesamt kann immerhin gut ein Fünftel der initialen Rohschlacke (20.8 %) durch Saidef und SELFRAG wiederverwertet werden. Der grösste Anteil entfällt dabei auf Eisen (7.2 %) der Überkornfraktion, welches sich mit Hilfe von Magneten relativ einfach abtrennen lässt. Auffällig ist der grosse Unterschied der Rückgewinnung zwischen Eisen und Nichteisen-Metalle, wenn man die Überkorn und SELFRAG Fraktionen vergleicht. Saidef holt deutlich mehr Eisen aus der Überkornfraktion, während sich die beiden Materialien bei SELFRAG etwa in Waage halten, wobei der Anteil an Nichteisenmetallen sogar etwas höher ist. Das liegt wahrscheinlich daran, dass bei einer Korngrösse von 2-40 mm die Trennung von Nichteisenmetallen mittels Wirbelstromscheider deutlich effektiver werden, während

die Effektivität von Magneten bei Eisen nachlässt, weshalb SELFRAG auf elektrodynamische Fragmentierung setzt. SELFRAG kann zudem neben Metallen auch inerte Materialien wie Glas oder Keramik zurückgewinnen. Bezogen auf ihre Fraktion kann SELFRAG aktuell ca. 7-8 % des jeweiligen Materials aus der Rohschlacke zurückgewinnen. Die Anlage ist noch im Probetrieb und ist noch nicht komplett ausgereift. Laut eigener Aussage strebt SELFRAG einen Rückgewinnungsanteil von 20-30 % an. Zuletzt fällt noch auf, dass es bei der Fraktion <2 mm keine Rückgewinnung gibt. Das liegt einerseits daran, dass es für diese Fraktion keine gesetzliche Grundlage bezüglich Metallrückgewinnung gibt und andererseits, dass es technisch sehr schwierig und aufwendig ist, eine so kleine Korngrösse noch zu trennen. [11]

## 4.4 Fazit der Stoffflussanalyse

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass KVAs ein gutes Mittel im Kampf gegen Abfallberge sind, da sie zum einen das Volumen erheblich verringern und gleichzeitig daraus Heizwärme und Strom gewinnen. Allerdings wird das Problem des begrenzten Platzes in Deponien damit nicht gelöst. Hier bietet das Verfahren von SELFRAG einiges an Potenzial. So können zum heutigen Stand (Dezember 2021) doch immerhin ca. 21 % der entstehenden Schlacke wiederverwendet werden, was jährlich ca. 2,450 t an Material entspricht. Und das Potenzial ist noch nicht ausgeschöpft, da SELFRAG sein Verfahren laufend weiterentwickelt. Durch die verschiedenen Bearbeitungsprozesse entstehen verschiedene Fraktionen von Restschlacke, mit unterschiedlichen chemischen und mineralischen Zusammensetzungen. In einem nächsten Schritt soll nun untersucht werden, ob sich Teile dieser Restschlacke für eine Weiterverwendung eignen und welche chemischen und physikalischen Parameter sie dafür erfüllen müssen.

## 5. Verwendung von KVA-Schlacke

In diesem Kapitel werden die Verwendungsmöglichkeiten für KVA-Schlacke und die chemischen und physischen Voraussetzungen, welche sie dafür erfüllen muss, betrachtet. Zusätzlich wird erläutert, ob sich die Eignung der Schlacke durch das SELFRAG-Verfahren verändert.

Ein grosses Problem, welches der Verwendung von KVA-Schlacke im Weg steht, ist ihr Anteil an Schwermetallen. Diese liegen in der KVA-Schlacke in elementarer Form, als Legierung und gebunden in Phasen wie Gläser, Oxiden (z. B. Spinellen) und Silikaten (z. B. Pyroxene und Melitithe) vor. Diese beginnen nach kurzer Zeit zu korrodieren, was zur Mobilisierung der Schwermetalle führt. In einem geeigneten chemischen Milieu werden die Schwermetalle als Oxide, Hydroxide und Carbonate neu gebunden, was durch Sorption auf der Oberfläche der Festphase geschehen oder zur Bildung neuer, sekundärer mineralischer Phasen führen kann. Bei niedrigeren pH-Werten werden diese Verbindungen geschwächt, was den Abtransport der Schwermetalle durch Wasser begünstigt und so zur Kontamination der Umwelt führt. Die veränderte Mineralogie, zum Beispiel beim Kontakt mit Zement oder andere mineralische Phasen, kann die Schwermetallmobilisierung zusätzlich beeinflussen. So zum Beispiel könnten Schwermetalle aus der Schlacke an den Oberflächen von Zementmineralien, wie zum Beispiel Tobermorite, sorbieren oder in den Zwischenschichten von C-S-H Phasen eingebaut werden. [17]

### 5.1 Gesteinskörnung, wie Kies und Sand

Hierbei wird die Schlacke vor allem im Strassenbau oder in der Fundamentlegung von Gebäuden verwendet und erfüllt dabei den gleichen Zweck wie Kies oder Sand.

Das Hauptproblem mit dieser Anwendung ist das Austreten verschiedener Schwermetalle (Cu, Pb, Zn, Ni, Sb, Cr, Mo). Auch enthält die KVA-Schlacke Sulfate und Chloride, welche ebenfalls die Umwelt belasten. Ein weiteres Problem stellt die Reaktion von nicht oxidiertem Aluminium in der KVA-Schlacke mit Alkalisalzen dar, was unter anderem zur Bildung von Wasserstoff und somit zur Blasenbildung führen kann, was zum Beispiel zu Schäden am Strassenbelag führen kann. [18]

Da durch das SELFRAG-Verfahren die Schlacke von Sulfaten und Chloriden gereinigt wird, ist die Restschlacke nach dem SELFRAG-Verfahren besser für die Nutzung als Gesteinskörnung geeignet als die unbehandelte KVA-Schlacke. [11]

In der Tabelle 12 ist zu erkennen, dass von den beiden Gruppen der Restschlacke die Gruppe 1, welche das SELFRAG-Verfahren durchlaufen hat, einen kleineren Anteil an Chlor (Cl) aufweist, während die Gruppe 2, welche vor der Metallrückgewinnung aussortiert wurde, mit  $\text{SO}_3$  einen grösseren Sulfatanteil besitzt. Somit eignet sich die Restschlacke aus der Gruppe 1 besser als Gesteinskörnung. Was die Korngrösse angeht, so würden die Körnungen von 2-10 mm und von 10-40 mm in der Bauindustrie als Kies (2-63 mm) bezeichnet und auch als solcher genutzt werden. Bei der Restschlackekörnung mit mehr als 40 mm Grösse müssten die Teile mit mehr als 63 mm entweder aussortiert oder zerkleinert werden, um als Kies Verwendung zu finden. Da diese Fraktion jedoch einen hohen Restmetallgehalt aufweist, hat die Metallrückgewinnung und die damit einhergehende Zerkleinerung des Materials grössere Priorität als deren Verwendung als Kies. Die Restschlackefraktionen mit einer Korngrösse von weniger als 2 mm sind die einzigen Fraktionen, welche in der Bauindustrie als Sand (0.063-2 mm) bezeichnet werden würde. Eine Anwendung im Strassenbau ist neben der Grösse der Körnung auch abhängig von ihrer Form. Üblicherweise wird im Strassenbau scharfkantiges Gestein mit einer Grösse von 32-63 mm, das sogenannte Split verwendet. [11], [18], [19]

### 5.1.1 Fazit zur Verwendung als Gesteinskörnung

Während in anderen Ländern, wie zum Beispiel den Niederlanden, Rohstoffe wie Kies rar sind, besteht dieses Problem in der Schweiz dank den Alpen nicht. Der Vorteil, welche herkömmliche Gesteinskörnung gegenüber der KVA-Schlacke hat, ist das Fehlen von Schwermetallen und anderen Schadstoffen. Diese machen eine Anwendung der KVA-Schlacke im Tief- und Strassenbau schwierig.

## 5.2 Anwendung in der Zement- und Betonherstellung

Der folgende Abschnitt beschäftigt sich mit der Anwendung von KVA-Schlacke in der Zement- und Betonherstellung. Dabei werden unter anderem die nötigen chemischen und physischen Voraussetzungen untersucht, welche die KVA-Schlacke erfüllen muss, ebenso wie der Einfluss ihrer verschiedenen Inhaltsstoffe auf den Zement und Beton. Aufgrund der grossen Anzahl verschiedener Zementarten, welche alle unterschiedliche Anwendungszwecke und Zusammensetzungen haben, konzentriert sich das folgende Kapitel auf Portlandzement (CEM I-SR 0), welcher die weltweit meistgenutzte Zementart ist. Dieser besteht aus mindestens 95 % Zementklinker und maximal 5 % Zusatzstoffen. Der durchschnittliche Zementklinker besteht seinerseits aus 65 % Kalziumoxid ( $\text{CaO}$ ), 20 % Siliziumdioxid ( $\text{SiO}_2$ ), 6 % Aluminiumoxid ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) und 3 % Eisen (III)-oxid ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) (siehe Abbildung 11). Die übrigen 6 % sind Nebenbestandteile wie Alkalien, Gips und Feuchtigkeit, welche auf der Abbildung 11 nicht erfasst sind. [20], [21]

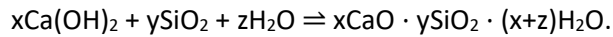
### 5.2.1 Zuschlagstoff in der Betonherstellung

KVA-Schlacke kann in der Betonherstellung bis zu einem gewissen Punkt die Aufgabe von Kies und Sand als Zuschlagstoff übernehmen. Die Problematik besteht hierbei aus der physischen Belastbarkeit des Betons und der Freisetzung von Schwermetallen. Ein weiteres Problem ist die Tatsache, dass nicht oxidierte Metalleinschlüsse wie Aluminium und Zink, welche in der KVA-Schlacke vorhanden sind, mit Alkalisalzen reagieren können, wodurch Wasserstoffgas, Hydrocalumit, Aluminium(hydr)oxid und Ettringit entsteht. Bei diesen Reaktionen expandiert das involvierte Material, was zu Abplatzungen und Rissen führen und die Stabilität des Betons mindern kann. Eine Möglichkeit, um diese Reaktion zu verhindern, ist die Behandlung der KVA-Schlacke mit einer Natriumhydroxidlösung. Trotz dieser Behandlung nimmt die physische Belastbarkeit des Betons mit zunehmendem Anteil an KVA-Schlacke ab, weshalb nicht komplett auf Sand und Kies verzichtet werden kann. Ein weiteres Problem stellen die Chloride in der KVA-Schlacke dar, welche zur Korrosion der Betoneisen führen und somit die Stabilität des Betons gefährden können. [18]

Nach dem SELFRAG-Verfahren weist die Restschlacke noch immer einen gewissen Zinkanteil auf. Dieser Anteil ist jedoch kleiner als zuvor. Der Anteil an nicht oxidiertem Aluminium wird ebenfalls sehr stark reduziert. Dadurch sinkt die Wahrscheinlichkeit einer Reaktion mit Alkalisalzen und die damit einhergehende Schädigung des Betons. Auch wird während des SELFRAG-Verfahrens die Schlacke von Chloriden befreit. Aus der Tabelle 12 ist zu entnehmen, dass in der Gruppe 1 die Fraktionen mit Korngrössen von 10-40 mm und 2-10 mm sowohl die kleinsten Anteile an Zink (Zn) als auch an Chlor (Cl) aufweisen und somit in Anbetracht der chemischen Zusammensetzung am besten als Zuschlagstoff geeignet sind. Beide Grössenfraktionen liegen im Bereich der brauchbaren Korngrösse. [22]

## 5.2.2 Ersatzstoff für Zement in der Betonherstellung

In der Betonherstellung kann KVA-Schlacke als Ersatz für Zement verwendet werden, wobei jedoch nicht 100 % des Zements ersetzt werden kann. Das ist möglich, da KVA-Schlacke, dank ihrem Anteil an Kalziumoxid (CaO) und Siliziumdioxid (SiO<sub>2</sub>), zur puzzolanischen Reaktion fähig ist. In Verbindung mit Wasser reagieren diese Stoffe miteinander zu Calciumsilikathydraten, welche für die Festigkeit des Betons verantwortlich sind. Die Reaktionsgleichung lautet:



Ca(OH)<sub>2</sub> entsteht, wenn CaO mit Wasser vermengt wird ( $\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} \Rightarrow \text{Ca(OH)}_2$ ).

Bei Versuchen hat sich herausgestellt, dass die Belastbarkeit des Betons bei hohen Anteilen an KVA-Schlacke als Zementersatz abnimmt, weshalb auf die Zugabe von Zement nicht komplett verzichtet werden kann [18]. Grund dafür ist der niedrigere Anteil an CaO in der KVA-Schlacke im Vergleich zu Zement, was zur Bildung einer kleineren Anzahl von Calciumsilikathydraten führt. Diese Verwendung von KVA-Schlacke wird allgemein als weniger sinnvoll erachtet als ihre Verwendung als Zuschlagstoff in der Betonherstellung. [18], [20]

Aus der Abbildung 11 sind die Mengenanteile von CaO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> und Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> in durchschnittlichem Zementklinker zu sehen. Der Anteil an CaO liegt im Durchschnitt bei 65 %, der von SiO<sub>2</sub> bei 20 %. In der Tabelle 12 ist ersichtlich, dass das Verhältnis von CaO und SiO<sub>2</sub> in der Schlackegruppe 2 für die Anwendung als Zementersatz besser geeignet ist als in der Gruppe 1. Dem gegenüber steht jedoch der grössere Anteil an Chlor (Cl) und Zink (Zn), welche sich negativ auf die Langlebigkeit des Betons auswirken. Um zu klären, welche Fraktion sich am besten als Zementersatz eignet, müsste untersucht werden, welche dieser Faktoren sich negativer auf die Festigkeit und Langlebigkeit des Betons auswirken. Ein Vorteil, welchen die Fraktionen der Gruppe 2 haben, ist ihre Korngrösse von weniger als 2 mm. Denn um die Restschlacke als Zementersatz nutzbar zu machen, muss sie, wie Zementklinker auch, sehr fein zermahlen werden, um eine möglichst grosse Oberfläche zu erzeugen, was ihre Reaktionsfähigkeit steigert. Der Aufwand, um die Schlacke auf die richtige Grösse zu zermahlen, ist somit geringer. [20], [23]

### 5.2.3 Nutzung als Rohstoff in der Zementklinkerproduktion

Die wichtigsten Bestandteile von Zementklinker sind  $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  und  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ .

Alle diese Stoffe sind in KVA-Schlacke vorhanden, weshalb sich diese zum Teil für die Herstellung von Zementklinker eignet. Besonders die hohe Konzentration an  $\text{CaO}$  und  $\text{SiO}_2$  sind vorteilhaft. Durch das  $\text{CaO}$  kann Kalkstein eingespart werden, was die  $\text{CO}_2$  Emissionen während der Zementproduktion stark verringert. Grund dafür ist die Tatsache, dass neben der Förderung auch das Erhitzen des Kalksteins, was bei der Herstellung von Zementklinker unumgänglich ist, um unter anderem aus Kalkstein ( $\text{CaCO}_3$ )  $\text{CaO}$  zu machen, eine grosse Menge  $\text{CO}_2$  freisetzt. Für die Klinkerproduktion ist das richtige Verhältnis von  $\text{SiO}_2$  zu  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  und  $\text{Al}_2\text{O}_3$  und das richtige Verhältnis von  $\text{Al}_2\text{O}_3$  zu  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  wichtig. Da die Zusammensetzung von KVA-Schlacke nicht konstant gleich ist, muss der Anteil der neben der Schlacke zugefügten Stoffen den Stoffanteilen der Schlacke angepasst werden, um den Standards der Zementindustrie gerecht zu werden. Ein weiteres Problem sind die Chloride in der KVA-Schlacke. Diese können bei einer zu hohen Konzentration während des Brennvorgangs Schäden an den Zementöfen verursachen. Aus diesem Grund sollte ein Chlorid Anteil von 100 ppm der Masse der ungebrannten Klinkermischung nicht überschritten werden. Die physische Belastbarkeit von Beton, welcher mit Zementklinker hergestellt wurde, der 3.5 % KVA-Schlacke enthält, unterscheidet sich nicht nennenswert von Beton, welcher mit schlackenfreiem Portlandzement hergestellt wurde. [18]

Allerdings wurde festgestellt, dass sich die Aushärtungszeit des Betons durch die Zugabe von KVA-Schlacke zur Zementklinkermischung um 5-15 % verlängert. Das Austreten von Schwermetallen stellt bei dieser Anwendung weniger ein Problem dar, da durch die Integration der Schwermetalle in das Zementgitter das Austreten dieser Stoffe stark reduziert wird. [18]

Durch das SELFRAG-Verfahren wird der Anteil an  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  und  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  in der Schlacke reduziert. Da  $\text{Al}_2\text{O}_3$  und  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  nur in vergleichsweise kleinen Mengen benötigt werden und  $\text{SiO}_2$  noch immer einen grossen Teil der Restschlacke ausmacht, kann hier nicht ohne weiteres von einer Minderung der Eignung gesprochen werden. Zusätzlich wird der Chloridgehalt der Schlacke gesenkt, was in der Tabelle 12 in den Fraktionen der Gruppe 1 ersichtlich ist (siehe CI). Dadurch kann mehr Restschlacke dem Klinkergemisch beigelegt werden, ohne in Gefahr zu laufen, die Klinkeröfen zu beschädigen. Die Gruppe 2 weist einen grösseren Anteil an  $\text{CaO}$  auf, was im Zementklinker den grössten Anteil ausmacht und für die Festigkeit des Betons von grosser Bedeutung ist. Der grössere Anteil an Chloriden verhindert jedoch, dass grössere Mengen der Fraktionen der Gruppe 2 in der Klinkermischung verwendet werden können. Die Fraktionen der Gruppe 1 weisen einen deutlich geringeren Anteil an Chloriden auf, sind jedoch wegen ihrem kleineren Anteil an  $\text{CaO}$  weniger wertvoll für die Zementklinkerproduktion. [18]

In der Verordnung SR 814.600 über die Vermeidung und die Entsorgung von Abfällen (VVEA) vom 4.12.2015, Anhang 4, Ziffer 1.1 bis 1.6 werden die Bedingungen beschrieben, unter welchen Abfälle für die Herstellung von Zement und Beton zugelassen sind. In der Ziffer 1.3 c wird der maximale Massenanteil, welcher Abfall und somit KVA-Schlacke im Zementklinker ausmachen darf, mit 5 % angegeben. [3]

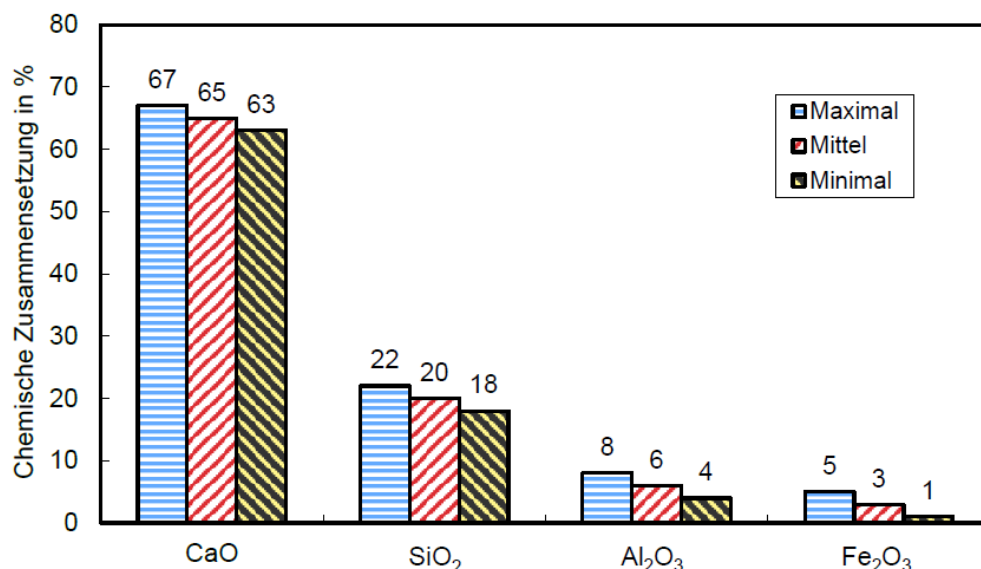


Abbildung 11: Zusammensetzung von durchschnittlichem Zementklinker [23]

## 5.2.4 Gesetzliche Grenzwerte und Stoffanteile der KVA-Schlacke

Laut der Verordnung SR810.600 über die Vermeidung und die Entsorgung von Abfällen (VVEA) vom 4.12.2015, Anhang 4, Ziffer 1.1 darf Abfall, welcher in der Zement- und Betonherstellung verwendet werden soll, die Grenzwerte der Tabelle 1 nicht überschreiten. Wie in der Tabelle 11 ersichtlich, hält keine der Fraktionen alle in der Schweiz vorgegebenen Grenzwerte ein. Besonders hoch sind die Überschreitungen bei Kupfer (Cu) und Antimon (Sb). Ebenfalls problematisch sind die fehlenden Mengenangaben von Quecksilber (Hg) und Thallium (Tl) in der Restschlacke. Hinsichtlich der Grenzwerte ist die Fraktion 10-40 mm am vielversprechendsten. Sie weist die niedrigsten Werte an Antimon (Sb), Kupfer (Cu), Zink (Zn), Zinn (Sn) und TOC auf. Gleichzeitig hält diese Fraktion die Grenzwerte von Arsen (As), Cadmium (Cd), Cobalt (Co), Nickel (Ni) und TOC ein. Auch weist sie den geringsten Anteil an Chlor (Cl) auf. Die in der Tabelle 12 aufgeführten Verbindungen, welche 95 % der Masse der Restschlacke ausmachen, enthalten keine Elemente, für welche Grenzwerte bestehen. Auch sind keine Grenzwerte für diese spezifischen Verbindungen definiert. Letzten Endes ist noch anzumerken, dass KVA-Schlacke nach VVEA nicht in der Zement- und Betonherstellung verwendet werden darf. [3],[11]

## 5.2.5 Fazit Anwendung in der Zement- und Betonherstellung

Unbehandelt ist keine der Restschlackefraktionen für die Anwendung in der Zement- und Betonherstellung geeignet, da keine von ihnen alle stofflichen Grenzwerte einhält und KVA-Schlacke generell nicht für die Verwendung in der Zement- und Betonherstellung zugelassen ist. Theoretisch eignen sich die Fraktionen der Gruppe 1 besser für die Zement- und Betonherstellung, da sie einen niedrigeren Chlorgehalt aufweisen. [11]

### Zuschlagstoff in Beton:

Als Zuschlagstoff in Beton eignen sich die Fraktionen 10-40 mm und 2-10 mm aufgrund ihres kleinen Anteils an Zink (Zn) und Chlor (Cl) am besten. Auch eignet sich ihre Korngrösse für die Anwendung als Zuschlagstoff. Von diesen beiden Fraktionen weist die Fraktion 10-40 mm die weniger problematischen Grenzwertüberschreitungen auf, während die Fraktion 2-10 mm neben den von allen Fraktionen überschrittenen Stoffwerte auch einen zu hohen Anteil an Arsen (As) aufweist. [3], [11]

**Ersatzstoff für Zement in der Betonherstellung:**

Die Stoffe, welche es in diesem Zusammenhang besonders zu beachten gilt, sind die Anteile an CaO, Chlor (Cl) und Zink (Zn). In der Tabelle 12 ist zu sehen, dass die Fraktionen der Gruppe 2 einen höheren Anteil an CaO aufweisen. Im Vergleich dazu ist in den Fraktionen der Gruppe 1 der Anteil an CaO etwa halb so gross wie in den Fraktionen der Gruppe 2. Das bedeutet, dass die Fraktionen der Gruppe 1 durch die puzzolanische Reaktion von Wasser, SiO<sub>2</sub> und CaO weniger Calciumsilikathydrate bilden, was eine geringere Festigkeit zur Folge hat als bei den Fraktionen der Gruppe 2. Allerdings besteht mit der Gruppe 2 durch ihren grösseren Anteil an nichtoxidiertem Zink ein grösseres Risiko zur Reaktion mit Alkalisalzen und damit verbundenen Schäden am Beton. Zusätzlich fördert der höhere Chlorgehalt die Korrosion der Betoneisen, was sich negativ auf die Langlebigkeit des Betons auswirkt. [11],[18]

Somit besteht die Auswahl zwischen einem Zement, welcher einen stabileren Beton hervorbringt, welcher jedoch potenziell weniger langlebig ist und einem Zement, welcher zu einem weniger stabilen, dafür langlebigeren Beton führt. Für den stabileren, kurzlebigeren Beton würde sich die Fraktion <2 mm nass der Gruppe 2 anbieten, da dieser einen niedrigeren Chlorgehalt als die Fraktion <2 mm trocken aufweist und zusätzlich den höchsten Anteil an CaO aller Fraktionen besitzt. Für den weniger stabilen, dafür langlebigeren Beton eignet sich die Fraktion 10-40 mm der Gruppe 1, da sie am wenigsten Chlor und Zink beinhaltet. Ein mögliches Argument gegen diese Fraktion ist die Tatsache, dass die KVA-Schlacke, unabhängig von ihrer Fraktion, fein zermahlen werden muss, um mit dem Erzeugen einer möglichst grossen Oberfläche ihre Reaktionsfähigkeit zu steigern. Dabei wäre eine kleinere anfängliche Korngrösse von Vorteil. [18]

**Verwendung als Rohstoff in der Zementklinkerproduktion:**

Wenn von der Überschreitung der gesetzlichen Grenzwerte abgesehen wird, ist der Anteil an Chlor in der Restschlacke das grösste Hindernis für ihre Anwendung in der Zementklinkerproduktion. Besteht die Zementklinkermischung, wie gesetzlich festgelegt, aus 5 % KVA-Schlacke, so würde bei der Verwendung der chlorärmsten Fraktion, 10-40 mm der Gruppe 1, ein Chloranteil von 144.05 ppm entstehen. Dieser ist um 44.05 ppm höher als der empfohlene Anteil von 100 ppm der Masse der ungebrannten Zementklinkermischung. Somit besteht die Gefahr, dass beim Brennen der Klinkermischung Schäden an den Zementöfen entstehen. Für die Verwendung in der Zementklinkerproduktion ist die Fraktion 10-40 mm am besten geeignet, da ihre stoffliche Zusammensetzung am wenigsten stark korrigiert werden muss, um die verlangten Grenzwerte einzuhalten (siehe Tabelle 11). [3], [11], [18]

Tabelle 11: Grenzwerte und Stoffanteile Restschlacke [3], [11]

|                       |
|-----------------------|
| Restschlacke Gruppe 1 |
| Restschlacke Gruppe 2 |
| Alle Angaben in mg/kg |

| Fraktion      | Sb  | As  | Pb    | Cd | Cr    | Co  | Cu    |
|---------------|-----|-----|-------|----|-------|-----|-------|
| >40 mm        | 125 | 156 | 584   | 0  | 1,493 | 187 | 3,177 |
| 10-40 mm      | 77  | 0   | 687   | 0  | 978   | 160 | 2,019 |
| 2-10 mm       | 96  | 67  | 916   | 0  | 1,076 | 144 | 2,753 |
| <2 mm trocken | 175 | 0   | 1,080 | 0  | 759   | 138 | 2,947 |
| <2 mm nass    | 191 | 0   | 1,063 | 0  | 736   | 114 | 2,880 |
| <2 mm SELFRAG | 134 | 0   | 1,041 | 0  | 1,043 | 194 | 3,921 |
| Grenzwerte    | 30  | 30  | 500   | 5  | 500   | 250 | 500   |

| Fraktion      | Ni  | Hg                 | Tl                 | Zn    | Sn  | TOC    |
|---------------|-----|--------------------|--------------------|-------|-----|--------|
| >40 mm        | 401 | Keine Anga-<br>ben | Keine Anga-<br>ben | 3,009 | 244 | 3,400  |
| 10-40 mm      | 237 | Keine Anga-<br>ben | Keine Anga-<br>ben | 2,293 | 134 | 1,822  |
| 2-10 mm       | 210 | Keine Anga-<br>ben | Keine Anga-<br>ben | 2,574 | 183 | 3,688  |
| <2 mm trocken | 223 | Keine Anga-<br>ben | Keine Anga-<br>ben | 4,441 | 387 | 10,794 |
| <2 mm nass    | 227 | Keine Anga-<br>ben | Keine Anga-<br>ben | 4,443 | 238 | 14,184 |
| <2 mm SELFRAG | 439 | Keine Anga-<br>ben | Keine Anga-<br>ben | 4,019 | 436 | 7,048  |
| Grenzwerte    | 500 | 1                  | 3                  | 2,000 | 100 | 50,000 |

Tabelle 12 12: Chemische Zusammensetzung der Restschlacke [11]

| Fraktion     | SiO <sub>2</sub> | CaO     | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | SO <sub>3</sub> | Na <sub>2</sub> O | MgO     | TiO <sub>2</sub> | K <sub>2</sub> O | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | MnO     | LOI*    | TOC     | Cl      | Ba      | Cu      |
|--------------|------------------|---------|--------------------------------|--------------------------------|-----------------|-------------------|---------|------------------|------------------|-------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|              | [mg/kg]          | [mg/kg] | [mg/kg]                        | [mg/kg]                        | [mg/kg]         | [mg/kg]           | [mg/kg] | [mg/kg]          | [mg/kg]          | [mg/kg]                       | [mg/kg] | [mg/kg] | [mg/kg] | [mg/kg] | [mg/kg] | [mg/kg] |
| >40mm        | 321'076          | 270'169 | 141'622                        | 107'839                        | 12'172          | 23'315            | 16'846  | 18'999           | 10'818           | 9'732                         | 2'809   | 43'092  | 3'400   | 7'148   | 3'665   | 3'177   |
| 10-40mm      | 434'109          | 223'841 | 125'318                        | 98'912                         | 5'803           | 36'415            | 18'559  | 16'316           | 12'138           | 9'915                         | 1'695   | 3'000   | 1'822   | 2'881   | 3'280   | 2'019   |
| 2-10mm       | 427'081          | 232'569 | 122'358                        | 78'244                         | 7'098           | 42'716            | 19'056  | 16'899           | 12'003           | 16'403                        | 1'597   | 8'000   | 3'688   | 3'636   | 3'249   | 2'753   |
| <2mm tr      | 196'776          | 403'322 | 68'493                         | 53'682                         | 25'385          | 17'687            | 18'913  | 18'033           | 12'722           | 13'366                        | 1'307   | 111'000 | 10'794  | 15'798  | 3'689   | 2'947   |
| <2mm nass    | 181'688          | 440'178 | 61'208                         | 51'501                         | 31'844          | 12'695            | 19'364  | 18'038           | 8'042            | 12'773                        | 1'356   | 139'000 | 14'184  | 8'291   | 3'026   | 2'880   |
| <2mm Selfrag | 365'955          | 247'026 | 128'890                        | 103'906                        | 11'851          | 30'080            | 19'321  | 18'488           | 12'438           | 18'831                        | 1'625   | 21'000  | 7'048   | 4'885   | 3'177   | 3'921   |

| Fraktion     | Zn      | Cr      | Pb      | Sr      | Zr      | Ni      | Sb      | Sn      | W       | V       | Br      | As      | Ag      | Co      | Cd      |
|--------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|              | [mg/kg] | [mg/kg] | [mg/kg] | [mg/kg] | [mg/kg] | [mg/kg] | [mg/kg] | [mg/kg] | [mg/kg] | [mg/kg] | [mg/kg] | [mg/kg] | [mg/kg] | [mg/kg] | [mg/kg] |
| >40mm        | 3'009   | 1'493   | 584     | 675     | 376     | 401     | 125     | 244     | 117     | 0       | 16      | 156     | 0       | 187     | 0       |
| 10-40mm      | 2'293   | 978     | 687     | 0       | 430     | 237     | 77      | 134     | 101     | 0       | 0       | 0       | 0       | 160     | 0       |
| 2-10mm       | 2'574   | 1'076   | 916     | 0       | 309     | 210     | 96      | 183     | 66      | 0       | 6       | 67      | 0       | 144     | 0       |
| <2mm tr      | 4'441   | 759     | 1'080   | 0       | 256     | 223     | 175     | 387     | 67      | 0       | 63      | 0       | 0       | 138     | 0       |
| <2mm nass    | 4'443   | 736     | 1'063   | 0       | 259     | 227     | 191     | 238     | 87      | 0       | 38      | 0       | 0       | 114     | 0       |
| <2mm Selfrag | 4'019   | 1'043   | 1'041   | 0       | 326     | 439     | 134     | 436     | 152     | 0       | 13      | 0       | 0       | 194     | 0       |

\* LOI = H<sub>2</sub>O + CO<sub>2</sub> + TOC

## 6. Schlussfolgerung

In diesem Kapitel werden nach der Untersuchung in den vorherigen Kapiteln die Schlussfolgerung gezogen, ob sich KVA-Schlacke oder Teile der Schlacke eignen zur Herstellung von Zement. Die Resultate der einzelnen Kapitel werden kurz zusammengefasst und am Schluss des Kapitels wird eine Empfehlung abgegeben.

### 6.1 Zusammenfassung

#### Rechtliche Grundlage

Die Schweiz war unter den untersuchten Ländern das einzige Land, das Grenzwerte für die Weiterverwendung von Abfällen in der Zement- und Betonherstellung in einem Gesetz beschreibt. In den anderen untersuchten Ländern Deutschland, Österreich und den Niederlanden beziehen sich die gefundenen Grenzwerte hingegen auf den Schutz von Gewässern und Böden. Das liegt daran, dass die KVA-Schlacke in diesen Ländern vorwiegend im Strassen- und Tiefbau als Füllmaterial verwendet wird. Im Bericht werden die Grenzwerte aus der Schweiz verwendet. Es muss allerdings angemerkt werden, dass KVA-Schlacke in der Schweiz laut VVEA nicht als Rohmaterial verwendet, werden darf. Eine mögliche Anwendung setzt somit einer Anpassung des Gesetzes voraus.

#### Funktion KVA und Trennungsanlage

Nachdem die Abfälle bei der KVA angekommen sind, werden sie in einem Verbrennungsofen verbrannt. Die dabei entstandene Schlacke gilt es so gut wie möglich zu recyceln. Die Schlacke wird in 0 bis 2 mm Unterkorn sortiert, ausgewaschen, gesiebt und danach deponiert. Diese Fraktion ist laut Reglement nicht von weiterer Bedeutung. Auch nicht von Bedeutung ist die Fraktion, welche grösser als 50 cm gross ist. Zuletzt wird noch die Fraktion der Grösse 200 bis 500 mm direkt ausgesiebt und deponiert. Das Überkorn mit Grössen von über 40 mm wird in magnetische Metalle (FE) und nicht magnetische Metalle (NE) getrennt. Die Trennung von magnetischen Metallen erfolgt durch Magnettrommeln über den Förderbändern. Die Trennung der nicht magnetischen Metallen erfolgt durch einen Wirbelstromscheider. Die Korngrössen 40 bis 200 mm werden durch das gleiche Verfahren aussortiert und danach deponiert.

Die Fraktion der 2 bis 40 mm grossen Schlacke Teilchen ist von grosser Bedeutung für die Anlage der Saidef. Zuerst durchläuft sie einen Prozess, welcher Flotation genannt wird. Dabei werden Plastik und andere anorganische Schlacken Komponenten, welche eine geringe Dichte aufweisen mit Wasser aussortiert. Danach wird die Schlacke mittels eines Förderbandes an die spezialisierte Anlage der SELFRAG geschickt. Diese trennt die Schlacke mit der Hilfe von elektrodynamischer Fragmentierung entlang der Korngrenzen auf. Als Letztes wird nach FE, NE und inert (Glas, Keramik) getrennt. Die Abgase werden zuerst mit der Hilfe von elektrostatischen Platten vom Feinstaub getrennt. Danach werden die Rauchgase gewaschen, um Staubpartikel und Metaldämpfe zu entfernen. Das saure Wasser wird als nächsten Schritt filtriert, abgesetzt und neutralisiert. Zuletzt wird dieses Reingas mit Katalysatoren von Stickoxiden befreit. Die Wärmeenergie der Verbrennungsofen wird für die Stromproduktion mit einer Turbine verwendet. Dazu wird die Wärmeenergie auch in ein Fernwärme System umgeleitet.

#### Stoffflussanalyse

Das Sankey-Diagramm (Abbildung 7) zeigt die groben Stoffflüsse der Schlacke innerhalb der KVA Saidef und der in den Prozess integrierten SELFRAG Methode. Pro Jahr fallen 13,200 t Rohschlacke

an, die nach Korngrösse sortiert wird. Die Fraktion >40 mm wird von Saidef selbst sortiert, wodurch 950 t Eisen und 200 t NE-Metalle zurückgewonnen werden können, die Fraktion 10-40 mm wird von SELFRAG aufbereitet, wodurch 400 t Eisen, 500 t NE-Metalle und 400 t Inertmaterialien zurückgewonnen werden können. Die Fraktion <2 mm geht zusammen der Restschlacke der übrigen Prozesse direkt auf eine Deponie, was einer Gesamtmenge von 10,500 t entspricht. Dadurch können insgesamt ca. 21 % an Material zurückgewonnen werden (Tabelle 10).

Tabelle 9 sowie Abbildung 8-10 zeigen die Zusammensetzung der Restschlacke der jeweiligen Fraktionen bezüglich Restmetalle, Chemie und Mineralien. Die Restmetalle haben nur einen kleinen Anteil, was dafürspricht, dass die Metalle zu einem grossen Teil zurückgewonnen werden können. Die chemischen und mineralischen Eigenschaften sind stark Korngrössenabhängig und korrelieren miteinander. Kleine und nicht sortierte Korngrössen (Gruppe 2) haben tendenziell einen höheren Anteil an CaO, Sulfaten und Karbonaten sowie einen höheren TOC und Chlor Gehalt in der Spurenchemie, während sie bei der mineralischen Zusammensetzung weniger amorphe Mineralien, dafür mehr Feldspat, Sulfate und Hydroxide aufweisen als die grösseren und sortierten Korngrössen (Gruppe 1).

### **Verwendung von KVA-Schlacke**

KVA-Schlacke birgt viel Potenzial, das bislang in der Schweiz meist ungenutzt bleibt. Jedoch sind nicht alle Anwendungsmöglichkeiten auch erstrebenswert. Zum Beispiel hat die Schweiz, im Gegensatz zu den Niederlanden, keinen Mangel an Gesteinskörnung wie Kies. Deshalb ist die Verwendung der KVA-Schlacke als Gesteinskörnung im Tief- und Strassenbau in der Schweiz weniger sinnvoll, da weiterhin die zur Genüge vorhandenen herkömmlichen Gesteinskörnungen verwendet werden können. Die Anwendung in der Zement- und Betonherstellung ist rentabler, da durch das Verwenden von KVA-Schlacke nicht nur Rohstoffe wie CaO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> und Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> eingespart werden können, sondern auch die mit deren Förderung verbundenen Emissionen [18]. Allerdings ist keine der Restschlackefraktionen ohne weitere Behandlung für die Verwendung in der Zement- und Betonherstellung geeignet, da keine von ihnen alle Schadstoffgrenzwerte einhält [3] [11]. Besonders gross sind die Überschreitungen bei Kupfer (Cu) und Antimon (Sb). Aber auch die Anteile an Blei, Chrom, Zink und Zinn sind in allen Fraktionen zu gross. Wichtig wäre es noch, die Anteile von Quecksilber (Hg) und Thallium (Tl) zu untersuchen, da diese in der Abfallverordnung SR 814.600 des Bundesrates vom 4. Dezember 2015 im Anhang 4, Ziffer 1.3 b explizit erwähnt werden [3]. Keine der in der Tabelle 12 erfassten Verbindungen enthalten Elemente, zu denen Grenzwerte bestehen. Auch wirkt sich keine dieser Stoffverbindungen negativ auf die Verwendung der KVA-Schlacke in der Zement- und Betonherstellung aus. Laut einem Bericht zum Recycling von KVA-Schlacke von Springer Science+Business Media, würde die Verwendung von KVA-Schlacke in der Zementklinkerherstellung, bei einem Massenanteil von 5 % an der ungebrannten Zementklinkermasse ausreichen, um sämtliche neu produzierte KVA-Schlacke zu verarbeiten. Dabei stützt sich der Bericht auf Untersuchungen in Italien und der Insel Taiwan. [18]

## 6.2 Empfehlung

Die Weiterverwendung von KVA-Schlacke ist nicht nur eine Gelegenheit, um Rohstoffe zu sparen, sondern auch notwendig, um dem Problem des schwindenden Platzes in den Deponien der Schweiz Herr zu werden. Glücklicherweise bietet der grosse Bedarf an Zement und Beton eine gute Möglichkeit, die Massen an KVA-Schlacke, welche unsere Gesellschaft produziert, sinnbringend zu verwenden und abseits von Deponien unterzubringen. Das SELFRAG-Verfahren stellt dabei einen Schritt in die richtige Richtung dar, indem das Gesamtvolumen der Schlacke reduziert und Rohstoffe rückgewonnen werden. Aus diesem Grund ist eine Ausweitung der SELFRAG-Technologie auf weitere KVA's wichtig. Zusätzlich muss jedoch ein Verfahren entwickelt werden, welches die grossen Mengen an KVA-Schlacke effizient von Schwermetallen und Chloriden säubern kann. Eine Senkung der gesetzlichen chemischen Grenzwerte ist keine Option, schon allein wegen der Tatsache, dass alle Restschlackefraktionen die Grenzwerte zum Teil um ein Vielfaches überschreiten. Da das Austreten von Schwermetallen durch die Integration in ein Zementgitter stark reduziert wird, scheint die Verwendung von KVA-Schlacke als Rohstoff in der Klinkerproduktion am sinnvollsten. Diese Ansicht wird durch die Untersuchungsergebnisse aus Italien und der Insel Taiwan unterstützt, nach denen ein Schlackeanteil von lediglich 5 % der Zementklinkermischung ausreichen würde, um die gesamte Menge an neu produzierter KVA-Schlacke zu verarbeiten. Da KVA-Schlacke in der Schweiz laut VVEA nicht zur Anwendung als Rohmaterial im Zement zugelassen ist, müsste dies entsprechend angepasst werden. [3], [11], [18]

## 7. Danksagung

Die Vollendung unsere Projektarbeit wäre ohne die grosszügige und tatkräftige Unterstützung aller direkten und indirekten Beteiligten nicht möglich gewesen, weshalb ihnen unser Dank gebührt. Wir bedanken uns bei Frau Dr. Kaarina Schenk für das Bereitstellen von Rechercheunterlagen und das Beantworten von Fragen, bei Herrn Dr. Petar Mandaliev für die enge Betreuung des Projekts sowie bei den Vertretern der Saidef AG und SELFRAG AG, dass sie sich die Zeit genommen haben, uns ihre Anlage zu zeigen und Fragen zu beantworten.

## 8. Verzeichnisse

### 8.1 Literaturverzeichnis

- [1] F. Adam u. a., „kva-rueckstaendeinderschweiz.pdf“. Bundesamt für Umwelt (BAFU). Zugegriffen: Nov. 30, 2021. [Online]. Verfügbar unter:  
  
[https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwinlen1IO\\_zAhWDyaQKHS-mhC\\_QQFnoECCIAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.bafu.admin.ch%2Fdam%2Fbafu%2Fde%2Fdokumente%2Fabfall%2Fud-umwelt-diverses%2Fkva-rueckstaendeinderschweiz.pdf.download.pdf%2Fkva-rueckstaendeinderschweiz.pdf&usg=AOvVaw2AoSAGxmW182dz\\_2Hy9paD](https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwinlen1IO_zAhWDyaQKHS-mhC_QQFnoECCIAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.bafu.admin.ch%2Fdam%2Fbafu%2Fde%2Fdokumente%2Fabfall%2Fud-umwelt-diverses%2Fkva-rueckstaendeinderschweiz.pdf.download.pdf%2Fkva-rueckstaendeinderschweiz.pdf&usg=AOvVaw2AoSAGxmW182dz_2Hy9paD)
- [2] VBSA, „Kehricht-Verwertungs-Anlagen (KVA)“. <https://vbsa.ch/anlagegruppen/kva/> (zugegriffen Nov. 30, 2021).
- [3] Schweizerische Eidgenossenschaft, „SR 814.600 (VVEA)“, Juni 22, 2005. <https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/2015/891/de> (zugegriffen Nov. 30, 2021).
- [4] „About SELFRAG“, *Selfrag*. <http://www.selfrag.com/about/> (zugegriffen Dez. 10, 2021).
- [5] LAGA, „LAGA Mitteilung 20“. Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall. Zugegriffen: Dez. 01, 2021. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.laga-online.de/documents/m20\\_nov2003u1997\\_2\\_1517834540.pdf](https://www.laga-online.de/documents/m20_nov2003u1997_2_1517834540.pdf)
- [6] Bundesanzeiger, „Ersatzbaustoffverordnung–ErsatzbaustoffV“. Juli 16, 2021. Zugegriffen: Dez. 01, 2021. [Online]. Verfügbar unter:  
  
[http://www.bgbl.de/xaver/bgbl/start.xav?startbk=Bundesanzeiger\\_BGBl&jumpTo=bgbl121s2598.pdf](http://www.bgbl.de/xaver/bgbl/start.xav?startbk=Bundesanzeiger_BGBl&jumpTo=bgbl121s2598.pdf)
- [7] R. Fischer, „Verwendung von Hausmüllverbrennungsschlacke“. [Online]. Verfügbar unter:  
  
[https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwinlen1IO\\_zAhWDyaQKHS-mhC\\_QQFnoECCIAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.bafu.admin.ch%2Fdam%2Fbafu%2Fde%2Fdokumente%2Fabfall%2Fud-umwelt-diverses%2Fkva-rueckstaendeinderschweiz.pdf.download.pdf%2Fkva-rueckstaendeinderschweiz.pdf&usg=AOvVaw2AoSAGxmW182dz\\_2Hy9paD](https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwinlen1IO_zAhWDyaQKHS-mhC_QQFnoECCIAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.bafu.admin.ch%2Fdam%2Fbafu%2Fde%2Fdokumente%2Fabfall%2Fud-umwelt-diverses%2Fkva-rueckstaendeinderschweiz.pdf.download.pdf%2Fkva-rueckstaendeinderschweiz.pdf&usg=AOvVaw2AoSAGxmW182dz_2Hy9paD)

- ed=2ahUKEwjHpaaD99j0AhXHDewKHaCFCkwQFnoECAkQAQ&url=http%3A%2F%2Fwww.vi-  
vis.de%2Fwp-content%2Fuploads%2FMNA%2F2014\_mna\_209\_242\_fi-  
scher.pdf&usg=AOvVaw3X4Pu5oQSETlj8FhVKR3H\_
- [8] Bundesministers für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, *Recycling-Baustoffverordnung*. 2021. Zugriffen: Dez. 02, 2021. [Online]. Verfügbar unter:  
<https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Gesetzesnummer=20009212>
- [9] Rohrdorfer Transportbeton GmbH, „ÖNORM B 4710-1“. Zugriffen: Dez. 03, 2021. [Online]. Verfügbar unter:  
[https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwiT6P-rlsX0AhXUuKQKHTkwCWcQFnoE-CACQAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.rohrdorfer.at%2F2503\\_DE.pdf%3Fexp%3D24581626200200&usg=AOvVaw1\\_KLxNs8REj4K7nE-goSaB3](https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwiT6P-rlsX0AhXUuKQKHTkwCWcQFnoE-CACQAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.rohrdorfer.at%2F2503_DE.pdf%3Fexp%3D24581626200200&usg=AOvVaw1_KLxNs8REj4K7nE-goSaB3)
- [10] Rijkswaterstaat Environment, „Soil quality regulation first notification“. Zugriffen: Dez. 02, 2021. [Online]. Verfügbar unter: [https://rwsenvironment.eu/publish/pages/126568/soil\\_quality\\_regulation\\_first\\_notification\\_24\\_311345.pdf](https://rwsenvironment.eu/publish/pages/126568/soil_quality_regulation_first_notification_24_311345.pdf)
- [11] A. Glauser, G. Weibel, und U. Eggenberger, „Untersuchung der Restschlacke der KVA Saidef SA“, Institut für Geologie, Bern, Juni 2019.
- [12] J. Schäfer, „Entkommen zwecklos“. <https://steinertglobal.com/de/news/news-detail/entkommen-zwecklos-steinert-entwickelt-nichteisenmetall-schneider-fuer-sehr-feines-material-den-steinert-eddyc-fines/> (zugegriffen Dez. 02, 2021).
- [13] S. Seifert, V. Thome, und C. Karlstetter, „Elektrodynamische Fragmentierung“. [Online]. Verfügbar unter:  
<https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&v>

ed=2ahUKEwixn\_73n8X0AhWogf0HHd-yDgoQFnoECAYQAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.vi-  
vis.de%2Fwp-content%2Fuploads%2FRuR7%2F2014\_RuR\_431\_438\_Sei-  
fert.pdf&usg=AOvVaw3htN-HJ5TT3mPIEon\_xi0c

- [14] Müve Biel-Seeland AG, „Wie funktioniert eine KVA?“, *Müve Biel-Seeland AG*. <https://mu-eve.ch/verwertung/wie-funktioniert-eine-kva/> (zugegriffen Nov. 30, 2021).
- [15] O. Cencic und H. Rechberger, „Material Flow Analysis with Software STAN“. [Online]. Verfügbar unter: <http://enviroinfo.eu/sites/default/files/pdfs/vol119/0440.pdf>
- [16] Stan2Web, „Stan2Web“. <https://www.stan2web.net/> (zugegriffen Nov. 30, 2021).
- [17] „E-Mail Petar Mandaliev\_MobilitätSchwermetalle.pdf“.
- [18] B. Verbinen, P. Billen, J. Van Caneghem, und C. Vandecasteele, „Recycling of MSWI Bottom Ash“. Juli 01, 2017. Zugegriffen: Dez. 02, 2021. [Online]. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1007/s12649-016-9704-0>
- [19] BaustoffWissen, „Kies und Sand für die Bauindustrie“, *baustoffwissen*, März 15, 2018. <https://www.baustoffwissen.de/baustoffe/baustoffknowhow/grundstoffe-des-bauens/kies-und-sand-fuer-die-bauindustrie-abbau-einsatzbereiche-sandknappheit-sandimporte/> (zugegriffen Dez. 02, 2021).
- [20] Lehrstuhl Prof. Dr. A. Pfitzner, Dr. M. Andratschke, T. Tenschert, und W. Sax, „Chemie des Hausbaus“, Institut für Anorganische Chemie, Universität Regensburg, Nov. 2011. Zugegriffen: Nov. 30, 2021. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.uni-regensburg.de/chemie-pharmazie/anorganische-chemie-pfitzner/medien/data-demo/2011-2012/hausbau\\_ttws.pdf](https://www.uni-regensburg.de/chemie-pharmazie/anorganische-chemie-pfitzner/medien/data-demo/2011-2012/hausbau_ttws.pdf)
- [21] VÖZ | VEREINIGUNG DER ÖSTERREICHISCHEN ZEMENTINDUSTRIE, „Zementsorten, -bezeichnungen/Normen“. <https://www.zement.at/der-baustoff/zement/zementsorten-bezeichnungen-normen> (zugegriffen Dez. 02, 2021).
- [22] Holcim (Schweiz) AG, „1.3 Gesteinskörnungen für Beton“. <https://www.holcim-partner.ch/de/betonpraxis/gesteinskornungen-fur-beton> (zugegriffen Dez. 02, 2021).

- [23] Univ.-Prof. Dr.-Ing. K.-Ch. Thienel, „Bauchemie und Werkstoffe des Bauwesens“, Institut für Werkstoffe des Bauwesens. [Online]. Verfügbar unter:
- <https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwi2hcv4ncX0AhU2hf0HHRVxAzoQFnoECA-YQAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.unibw.de%2Fwerkstoffe%2Flehre%2Fbachelorstudium%2Fskripte-werkstoffe%2Fchemie-und-eigenschaften-anorganischer-baustoffe-und-bindemittel-2018.pdf%2Fdownload&usg=AOvVaw1wTiRGeG7s2i1bALoX9L4N>

## 8.2 Glossar

| Wort                             | Definition                                                                                                                                    |
|----------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Abplatzung                       | Ermüdungserscheinung stark beanspruchter Bauteile                                                                                             |
| Calciumsilikathydrat             | Das Produkt einer puzzolanischen Reaktion, wichtiger Bestandteil des Zements                                                                  |
| Elektrodynamische Fragmentierung | Materialtrennungungsverfahren mittels elektromagnetischer Impulse                                                                             |
| Eluat                            | Durch Eluation aus einer festen Phase herausgelöstes Material                                                                                 |
| HMVA                             | Hausmüllverbrennungsanlage – Deutscher Begriff für Kehrichtverbrennungsanlage                                                                 |
| Hochdruckdüse                    | Wasserdüse mit sehr hohem Druck, die zur Trennung von Materialien verwendet wird                                                              |
| Hochspannungsimpuls              | Kurzer Stromimpuls mit bis zu 200 kV                                                                                                          |
| Klinker                          | Gebrannte Bestandteile im Zement, die für die Aushärtung beim Zugeben von Wasser zuständig sind                                               |
| Kreislaufwirtschaft              | Wirtschaftstyp bei dem möglichst viel Materialien recycelt werden                                                                             |
| KVA                              | Kehrichtverbrennungsanlage – industrielle Anlage zur Verbrennung von Siedlungs- und Bauabfällen                                               |
| Mantelverordnung                 | Deutsche Verordnung zur Einführung von Ersatzbaustoffen                                                                                       |
| Puzzolanische Reaktion           | Chemische Reaktion von Calciumhydroxid und Siliziumoxid zu Calciumsilikathydraten, wichtig für das Aushärten von Beton                        |
| Rohmehl                          | Gemisch aus gemahlenen und getrockneten Rohstoffen                                                                                            |
| Schlacke                         | Restmaterial, welches nach der Verbrennung im Ofen übrig bleibt                                                                               |
| Spitzenentladung, Feldüberhöhung | Entladung eines mit Hochspannung geladenen Ladungsträgers entlang des geringsten Widerstands der magnetischen Feldlinien, so entstehen Blitze |
| Überbandmagnet                   | Magnet zur Trennung von magnetischer Eisen-Teilen                                                                                             |
| Wirbelstromscheider              | Trennungungsverfahren für NE-Metalle mittels eines induzierten Magnetfeldes                                                                   |

## 8.3 Abbildungsverzeichnis

|                                                                                                   |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Abbildung 1: KVA-Standorte Schweiz [2]                                                            | 6  |
| Abbildung 2: Der hydraulische Mehrschalengreifer greift nach Abfällen aus dem Abfallbunker        | 14 |
| Abbildung 3: Blick in einen Verbrennungssofen                                                     | 15 |
| Abbildung 4: Automatisch aussortierte Schlacke stücke grösser als 50 cm                           | 16 |
| Abbildung 5: Die NE-haltige Schlacke wird abgetrennt.                                             | 17 |
| Abbildung 6: Aufteilung der Schlacke in die FE, NE, Inert und Reste                               | 18 |
| Abbildung 7: Sankey-Diagramm Saidef & SELFRAG [11]                                                | 21 |
| Abbildung 8: Grafische Darstellung der chemischen Bestandteile der Restschlacke [11]              | 24 |
| Abbildung 9: Grafische Darstellung der Spurenchemie-Elemente in den verschiedenen Fraktionen [11] | 25 |
| Abbildung 10: Grafische Darstellung der in der Restschlacken enthaltenen Mineralien [11]          | 26 |
| Abbildung 11: Zusammensetzung von durchschnittlichem Zementklinker [22]                           | 33 |
| Abbildung 12: Schema der Metallrückgewinnungsanlage                                               | 47 |

## 8.4 Tabellenverzeichnis

|                                                                                                                                                                                                                                                                                   |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabelle 1: Grenzwerte für Abfall als Rohmaterial [3]                                                                                                                                                                                                                              | 7  |
| Tabelle 2: Grenzwerte Schwermetall Zementklinker aus Abfällen [3]                                                                                                                                                                                                                 | 8  |
| Tabelle 3: Materialwerte für geregelte Ersatzbaustoffe ohne Gleisschotter, Bodenmaterial und Bagger-gut [6]                                                                                                                                                                       | 9  |
| Tabelle 4: Kriterien Güteklasse HMVA 1-2 [7]                                                                                                                                                                                                                                      | 10 |
| Tabelle 5: Parameter und Grenzwerte für Gesteinskörnungen, die ausschliesslich zur Herstellung von Beton ab der Festigkeitsklasse C 12/15 oder für die Herstellung von Beton der Festigkeitsklasse C 8/10 ab der Expositionsklasse XC1 gemäss ÖNORM B 4710-1 verwendet werden [8] | 11 |
| Tabelle 6: Definition Expositionsklasse [9]                                                                                                                                                                                                                                       | 11 |
| Tabelle 7: Emissionsanforderungen für anorganische Parameter [10]                                                                                                                                                                                                                 | 12 |
| Tabelle 8: Zusammenfassung Grenzwerte DE, AUT und NLD                                                                                                                                                                                                                             | 13 |
| Tabelle 9: Restmetallgehalt nach Fraktion [11]                                                                                                                                                                                                                                    | 23 |
| Tabelle 10: Vergleich der Rückgewinnung                                                                                                                                                                                                                                           | 27 |
| Tabelle 11: Grenzwerte und Stoffanteile Restschlacke [3], [11]                                                                                                                                                                                                                    | 35 |
| Tabelle 12 : Chemische Zusammensetzung der Restschlacke [11]                                                                                                                                                                                                                      | 36 |

## 9. Ehrlichkeitsvereinbarung

Hiermit erklären wir, die vorliegende Projektarbeit selbständig und nur unter Benutzung der angegebenen Quellen verfasst zu haben. Die wörtlich oder inhaltlich aus den aufgeführten Quellen entnommenen Stellen sind in der Arbeit als Zitat bzw. Paraphrase kenntlich gemacht. Diese Projektarbeit ist noch nicht veröffentlicht worden. Sie ist somit weder anderen Interessierten zugänglich gemacht noch einer anderen Prüfungsbehörde vorgelegt worden.

Windisch, 17.12.2021



Fabio Domenig (Projektleiter)



Curdin Fitze



Jeremiel Mechan



Samuel Zaugg

[illegible]

Abbildung 12: Schema der Metallrückgewinnungsanlage