

# **Bestimmung der NE-Metallgehalte von aufbereiteten KVA-Schlacken**

im Auftrag des

**AWEL, Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft, Baudirektion Kanton Zürich und der  
Z-A-V, Zürcher Abfallverwertungs AG**

Endbericht

16. Oktober 2023

Stefan Skutan  
Ingenieurbüro Stefan Skutan e.U. (IBS)

Ingenieurbüro Stefan Skutan e.U.  
Fritz-Weigl-Gasse 1a  
3423 St. Andrä-Wördern  
Österreich

## KURZFASSUNG

Im Zuge des Schlackenprojekts von ZAV, AWEL und den Betreibern der fünf KVA im Kanton Zürich wurden Restschlacken dreier Aufbereiter einmalig untersucht, um Anhaltspunkte für die Nichteisenmetall-Restgehalte (NE-Metall) zu erhalten. Die charakterisierten Restschlackenmengen lagen jeweils im Größenordnungsbereich von 1 000 Tonnen. Analysiert wurde Schlacke der KVA Winterthur nach Aufbereitung durch die Gebr. Lienhard AG, Limeco-Schlacke nach Aufbereitung bei DHZ AG und Restschlacke der ZAV Recycling AG mit einem Inputschlacken-Mix von KEZO, KVA Horgen und ERZ. Es wurden verschiedene Analysemethoden allein und in Kombination eingesetzt mit ergänzenden Analysen an den abgetrennten NE-Metallfraktionen und Probenrestfraktionen, um ein differenziertes Bild der Restmetallgehalte zu erhalten und um die Analysemethoden zu testen und zu vergleichen.

Bei der Analysenvariante mit der ZAR-Methode wurden im Körnungsbereich 0,2-16 mm NE-Metalle, die unmittelbar mit der Wirbelstromabscheidetechnik noch abtrennbar waren, separat gemessen. Von diesen abgetrennten NE-Metall-Fractionen wurden zusätzlich die Reinheiten bestimmt, um die ZAR-Analysenwerte auch auf Basis reinen NE-Metalls angeben zu können. Grobes Metall >16 mm und die in Schlacken eingeschlossenen NE-Metalle 1-16 mm in den Rückständen der ZAR-Analyse wurden durch klassische Laboranalysen bestimmt. VA-Stahl und die eigentlichen NE-Metalle wurden dabei getrennt. In sämtlichen Probenresten wurde das metallische Aluminium (Al met) mit der Wasserstoff-Methode bestimmt. Die wesentlichen Messergebnisse daraus sind wie folgt:

NE-Metall		Gebr. Lienhard AG	DHZ AG	ZAV Recycling AG
<b>NE-Metall abtrennbar mit Wirbelstromabscheider (ZAR-Methode), Originalwert / Basis reines NE-Metall</b>				
NE 1-16 mm	[% TS]	0,30 / 0,16	0,53 / 0,36	0,39 / 0,32
NE 0,2-1 mm	[% TS]	0,03 / 0,01	0,05 / 0,01	0,16 / 0,14
<b>NE 0,2-16 mm</b>	<b>[% TS]</b>	<b>0,33 / 0,17</b>	<b>0,58 / 0,38</b>	<b>0,55 / 0,46</b>
<b>NE-Metall "eingeschlossen" (nicht abtrennbar ohne Brechen der Schlacke)</b>				
NE 1-16 mm	[% TS]	0,23	0,20	0,27
<b>Sonstige Anteile</b>				
NE-Metall >16 mm	[% TS]	0,01	0,01	0
feines, nicht abtrennbares NE-Metall in diversen Probenrückständen:				
Al met <1 mm	[% TS]	0,27	0,31	0,70
<b>Summe NE &gt;1 mm *</b>	<b>[% TS]</b>	<b>0,40</b>	<b>0,58</b>	<b>0,60</b>
<b>"Gesamtgehalt" *</b>	<b>[% TS]</b>	<b>0,68</b>	<b>0,91</b>	<b>1,43</b>

\* berechnet mit ZAR-Analysenwert auf Basis reinen NE-Metalls

Die Restschlacke der ZAV Recycling AG weist viel höhere Gehalte an feinem, metallischem Aluminium <1 mm auf. Wahrscheinlich ist, dass dieser Unterschied hauptsächlich durch Korrosionsverluste bzw. Kornbruch sehr dünner, filigraner Aluminium-Teilchen zustande kommt. Aluminium-Teilchen von wenigen Zehntel-mm Dicke z. B. brüchige Folienstücke können einerseits in Nassschlacke korrodieren, andererseits in Trockenschlacke bei der Aufbereitung zu feinen Teilchen brechen. Die vermuteten Effekte wurden ebenso wie andere mögliche Faktoren hier aber nicht untersucht.

Parallelproben der Restschlacken wurden auch mit den klassischen Labormethoden, der BAFU-Methode (Metall 2-16 mm in der Probenfraktion <16 mm) und der Bachema-Methode (Metall >1 mm in der Gesamtprobe) untersucht. An diese Analysen wurde eine Nachsortierung der Metallfraktionen angeschlossen, um den VA-Stahl, der bei diesen Analysen üblicherweise zum NE-

Metall gezählt wird, separat zu erfassen. In den Analysenrückständen <1 mm wurde auch das metallische Aluminium bestimmt. Die Ergebnisse sind wie folgt:

		Gebr. Lienhard AG	DHZ AG	ZAV Recycling AG
<b>BAFU-Methode, "NE-Metall" original, mit VA-Stahl / NE-Metall ohne VA-Stahl</b>				
"NE"- bzw. NE-Metall 2-16 mm	[% in TS <16 mm]	0,31 / 0,20	0,37 / 0,27	0,30 / 0,26
<b>Bachema-Methode "NE-Metall" original mit VA-Stahl / NE-Metall ohne VA-Stahl</b>				
"NE"- bzw. NE-Metall 2-16 mm	[% TS]	0,46 / 0,29	0,50 / 0,34	0,35 / 0,25
"NE"- bzw. NE-Metall >1 mm	[% TS]	0,66 / 0,39	0,92 / 0,56	0,51 / 0,39
Al met <1 mm				
im Rückstand der Analyse	[% TS]	0,27	0,34	1,01 *
<b>"Gesamtgehalt" NE-Metall</b>	<b>[% TS]</b>	<b>0,66</b>	<b>0,89</b>	<b>1,40</b>
* inkl. NE-schwer-Metall 0,2-1 mm durch ZAR-Analyse bestimmt				

Durch das Entfernen des VA-Stahls aus den originalen "NE"-Metallanalysenfraktionen sinken die Werte für das Rest-NE-Metall im Schnitt um ca. ein Drittel. Die BAFU-Methode liefert bei den Restschlacken, die auch grobe Körnung >16 mm enthalten (Gebr. Lienhard AG und DHZ AG), niedrigere Werte für das NE-Metall 2-16 mm als die Bachema-Methode. Anscheinend weisen die Probenkörnungen >16 mm dieser beiden Restschlacken höhere Gehalte an (eingeschlossenem) NE-Metall 2-8 mm auf als die bei der BAFU-Methode allein untersuchten Probenfraktionen <16 mm. (Die Restschlacke der ZAV Recycling AG ist generell der Körnung <15 mm, daher sind die Analysen nach BAFU- und Bachema-Methode gleichwertig. Unterschiede zwischen BAFU- und Bachema-Analysenwerten bei "NE"-Metall inkl. VA-Stahl ergeben sich hier zufällig durch einzelne große VA-Stahlteile in den Proben.)

Die drei Analysenmethoden stehen für verschiedene Messparameter, die die Restschlacken auf unterschiedliche Art charakterisieren. Die ZAR-Methode bestimmt spezifisch nur die NE-Metalle, die im jeweiligen Zustand des Materials mit der Wirbelstromabscheidetechnik erfassbar sind. Hier wurde festgestellt, dass die aus Restschlacken abtrennbaren NE-Metallkörner stark verschmutzt sein können und die Restmetall-Analysenwerte auf Basis reinen NE-Metalls deutlich tiefer liegen können als die Originalwerte der ZAR-Analyse. Die BAFU-Methode, als einfachste Bestimmung unter den drei Methoden beschränkt sich auf die Metalle 2-16 mm in der Probenfraktion <16 mm. Die Einschränkung auf die Probenkörnung <16 mm hat in der gegenständlichen Untersuchung einen deutlichen Anteil der Gesamtfracht an NE-Metallen 2-16 mm aus der Analyse ausgeschlossen, das zeigt der Vergleich mit den Ergebnissen aus der Bachema-Methode. Bachema- und BAFU-Methode ist gemein, dass eine erhebliche Menge an VA-Stahl als NE-Metall ausgewiesen wird, in dieser Untersuchung im Schnitt ca. ein Drittel des Messwerts.

Die Bachema-Methode misst Gesamtgehalte für das NE-Metall plus VA-Stahl >1 mm. Der Gesamtgehalt an eigentlichem NE-Metall ist durch eine Nachsortierung bestimmbar. Auch die Kombination aus ZAR-Methode inklusive Nachreinigung und Bachema-Methode für die Rückstände der ZAR-Analyse samt Nachsortierung misst die Gesamtgehalte für das NE-Metall >1 mm. Die beiden Varianten liefern bei den Restschlacken von Gebr. Lienhard AG und DHZ AG gut übereinstimmende Gesamtgehalte für das NE-Metall >1 mm. Bei der Restschlacke der ZAV Recycling AG ist das nicht der Fall. Hier liefert die ZAR-Analysenvariante einen um ca. 50 % höheren Wert, wahrscheinlich auf Grund von erhöhtem Kornbruch filigraner Aluminium-Teilchen bei der Bachema-Analyse. Die Restmetalle aus der Restschlacke der ZAV Recycling AG enthalten, optisch leicht erkennbar, sehr viel filigrane, dünne Aluminium-Teilchen. Auch der hohe Gehalt metallischen Aluminiums <1 mm im Rückstand der Bachema-Analyse spricht für starken Kornbruch beim Aluminium.

Die Summe aller in einer Probe gemessenen NE-Metalle, inklusive der Anteile feinen metallischen Aluminiums <1 mm, gibt eine gute Näherung für den Gesamtgehalt an NE-Metallen in einer Restschlacke. Die Übereinstimmung dieser näherungsweise Gesamtgehalte ist zwischen den beiden Bestimmungsvarianten ZAR- bzw. Bachema-Methode bei allen drei Restschlacken sehr gut (allerdings nur auf der Berechnungsbasis reiner NE-Metalle). Zu den Gesamtgehalten können die wirbelstromabscheidbaren NE-Metalle in Relation gesetzt werden. Die noch abscheidbaren NE-Metalle >0,2 mm machen Anteile der „Gesamtgehalte“ von 27 % bei Gebr. Lienhard AG, 43 % bei DHZ AG und 32 % bei ZAV Recycling AG aus. Für die abscheidbaren NE-Metalle >1 mm ergeben sich beim Bezug auf die gesamt enthaltenen NE-Metalle >1 mm (abtrennbares und eingeschlossenes Metall) 45 % bei Gebr. Lienhard AG, 65 % bei DHZ AG und 54 % bei ZAV Recycling AG.



# Inhalt

<b>1</b>	<b>Einleitung.....</b>	<b>3</b>
1.1	<i>Ausgangslage - Restschlackenuntersuchung im Schlackenprojekt.....</i>	3
1.2	<i>Einordnung der untersuchten Restschlacken.....</i>	3
1.2.1	Gebr. Lienhard AG.....	4
1.2.2	DHZ AG.....	4
1.2.3	ZAV Recycling AG.....	5
1.3	<i>Vergleichbarkeit der Schlackenaufbereitungsanlagen.....</i>	6
1.4	<i>Analysenmethoden.....</i>	6
<b>2</b>	<b>Zielsetzung.....</b>	<b>7</b>
<b>3</b>	<b>Vorgangsweise.....</b>	<b>9</b>
3.1	<i>Restschlacke Gebr. Lienhard AG, Deponie Riet, Winterthur.....</i>	9
3.1.1	Verarbeitete Schlacke.....	9
3.1.2	Probenahme.....	9
3.1.3	Analysen.....	10
3.2	<i>Restschlacke DHZ AG, Lufingen (Limeco Schlacke).....</i>	12
3.2.1	Verarbeitete Schlacke.....	12
3.2.2	Aufbereitung der Charge und Probenahme.....	13
3.2.3	Analysen.....	15
3.3	<i>Restschlacke ZAV Recycling AG, Hinwil.....</i>	15
3.3.1	Verarbeitete Schlacke.....	15
3.3.2	Probenahmezeitraum.....	16
3.3.3	Beprobte Materialströme.....	16
3.3.4	Probenahmestellen und -techniken.....	17
3.3.5	Probenzahlen und Mengen.....	17
3.3.6	Analysen.....	19
3.4	<i>Analysenmethoden.....</i>	19
3.4.1	Bachema-Analyse mit Nachsortierung der Metalle und Rückstandsanalyse.....	19
3.4.2	BAFU-Analyse mit Nachsortierung der Metalle und Rückstandsanalyse.....	22
3.4.3	ZAR-Analyse samt Rückstandsanalysen und Reinheitsbestimmung der NE-Metallfraktionen.....	22
3.5	<i>Kontrolle der Ausführung der Restschlackenuntersuchung.....</i>	25
<b>4</b>	<b>Ergebnisse.....</b>	<b>27</b>
4.1	<i>Restschlacke Aufbereitung Gebrüder Lienhard AG, Deponie Riet, Winterthur.....</i>	27
4.2	<i>Restschlacke Aufbereitung DHZ AG, Lufingen.....</i>	30
4.3	<i>Restschlacke Aufbereitung ZAV Recycling AG, Hinwil.....</i>	32
4.3.1	Massenanteile der einzelnen Restschlackenfraktionen.....	32
4.3.2	Analysenergebnisse von den einzelnen Restschlackenfraktionen.....	33
4.4	<i>Methodenvergleich BAFU-, Bachema- und ZAR-Methode zur NE-Metallbestimmung in den Restschlacken.....</i>	38
4.4.1	Unterschiedliche Abscheidung von NE-Metallfraktionen.....	39
4.4.2	Miterfassung von VA-Stahl.....	42
4.4.3	Reinheit der gewogenen NE-Metallfraktionen.....	43

4.4.4	Gegenüberstellung der NE-Metall-"Gesamtgehalte" aus den verschiedenen Messmethoden .....	49
4.4.5	Gehalte an NE-Metallen >1 mm nach ZAR-Methode versus Gesamtgehalte NE-Metalle >1 mm .....	52
4.4.6	Fazit aus dem Methodenvergleich .....	53
4.5	<i>Vergleich der drei untersuchten Restschlacken</i> .....	54
<b>5</b>	<b>Zitierte Quellen</b> .....	<b>61</b>
<b>6</b>	<b>Anhang</b> .....	<b>63</b>

## 1 Einleitung

### 1.1 Ausgangslage - Restschlackenuntersuchung im Schlackenprojekt

Im Zuge des "Schlackenprojekts", das von ZAV, AWEL und den Betreibern der fünf KVA im Kanton Zürich gemeinsam initiiert wurde, ist beschlossen worden, neben den rohen Schlacken der fünf KVA auch Restschlacken aus Schlackenaufbereitungsanlagen auf NE-Metallgehalte zu untersuchen. Die Restschlackenuntersuchung sollte genutzt werden, um (1) die verschiedenen Analysenverfahren zu vergleichen und (2) um orientierende Werte für die Restmetallgehalte von KVA-Schlacken nach der Aufbereitung durch

- die mobile Anlage der Gebr. Lienhard AG,
- die Anlage der DHZ AG in Lufingen und
- die Anlage der ZAV Recycling AG in Hinwil

zu erhalten. Vorgabe für diese Untersuchung war, eine hohe Qualität bei allen Arbeitsschritten einzuhalten, aber den Aufwand an den Zweck einer orientierenden Untersuchung anzupassen. Aus diesem Grund wurde je Aufbereitungsanlage jeweils nur eine Probe untersucht, das heißt, es fehlt die Kontrolle der Genauigkeit über die Wiederholstreuung der Untersuchung. Außerdem wurden keine großen Grundgesamtheiten bzw. lange Probenahmezeiträume gewählt, sondern die minimalen Größen, um aussagekräftige Einzelmessungen zu erhalten. Die Restschlackenuntersuchung wurde ausdrücklich nicht zu dem Zweck gestartet, Daten zur Stoffbilanzierung, korrespondierend zu den Rohschlackenanalysen zu messen.

### 1.2 Einordnung der untersuchten Restschlacken

NE-Metalle aus KVA-Schlacken rückzugewinnen und dem Recycling zuzuführen, erfordert eine Kette an Aufbereitungsschritten. In den meisten Fällen werden die NE-Metalle im ersten Schritt der Aufbereitung mit Wirbelstromabscheidern aus den Schlacken abgetrennt ("primäre Metallabscheidung"). Im zweiten Schritt müssen diese NE-Metallschrotte aufbereitet werden, weil sie aus einem Gemisch verschiedener NE-Metalle bestehen und oft auch zu hohe Anteile an Verunreinigungen aufweisen. Die NE-Metalle aus den KVA-Schlacken werden schlussendlich mittels Dichtentrennung in Alu-Schrotte für das Alu-Recycling (Einsatzmaterial für Alu-Remelter) und NE-schwer-Metallschrotte zum Einsatz in Kupferhütten konfektioniert. Je nach Verschmutzung (Schlackenanteil) der rohen NE-Metalle fallen in der Schrottveredelung unterschiedliche Mengen schlackenähnlicher Abfälle an. Die Veredelung wird zum Teil von den Schlackenaufbereitern selbst durchgeführt, zum Teil werden rohe Schrotte an Schrottaufbereiter verkauft. Je nachdem, in welchem Zustand die Schrotte vom Schlackenaufbereiter verkauft werden, fallen nachgelagert an anderen Stellen der Verarbeitungskette schlackenähnliche Abfälle aus der Veredelung an. Die Qualität der fertig konfektionierten Schrotte beeinflusst schließlich die Metallerträge und den Energieeinsatz in den Schmelzwerken und Metallhütten. Außerdem hängt davon ab, welche Mengen an Abfällen in den Schmelzprozessen (z.B. Salzschlacke beim Alu-Remelter) gebildet werden.

Die drei untersuchten Restschlacken sind Restschlacken aus der primären Metallabscheidung. (Anmerkung: Bei der Aufbereitung der Gebr. Lienhard AG wird der Rückstand aus der Metallveredelung in die primäre Metallabscheidung rückgeführt.) Die Konzepte der drei Schlackenaufbereiter unterscheiden sich in Bezug auf Rückstände aus der unternehmensinternen Metallveredelung. Um die untersuchten Restschlacken jeweils im ganzen System der Schlackenaufbereitung bzw. Metallrückgewinnung einordnen zu können, sind im Folgenden die drei Konzepte in ihren wesentlichen Merkmalen beschrieben.

### 1.2.1 Gebr. Lienhard AG

Die Gebr. Lienhard AG betreibt eine mobile Schlackenaufbereitungsanlage, mit der auf Deponiestandorten die Primärabscheidung der NE-Metalle aus zwischengelagerten Nassschlacken erfolgt. Am Unternehmensstandort in Degersheim werden die Metalle veredelt. Das grundsätzliche Flussschema dieses Behandlungskonzepts ist wie folgt:

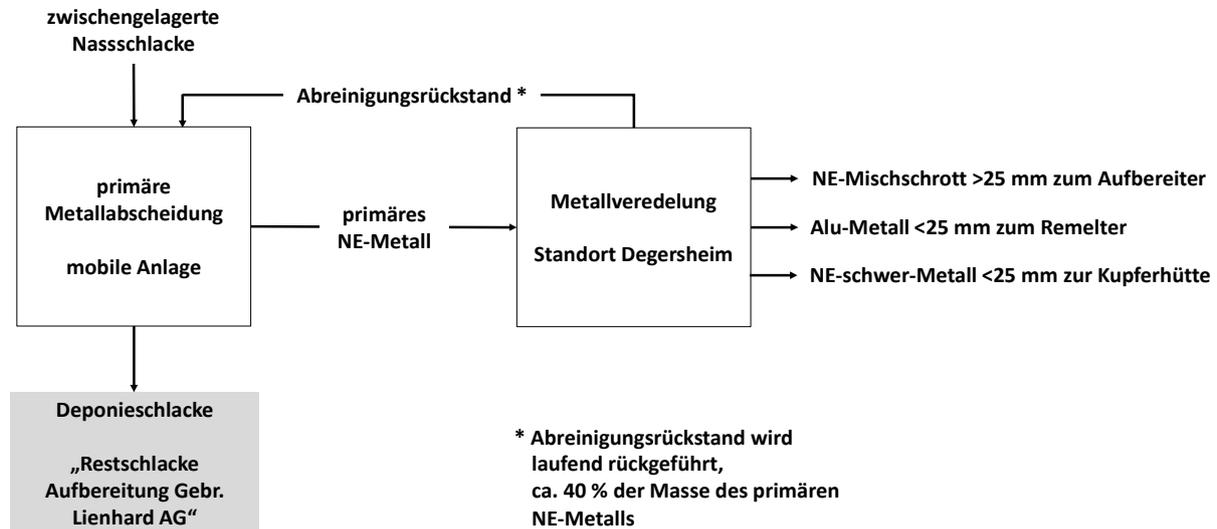


Abb. 1: Schlackenaufbereitung und Metallveredelung bei Gebr. Lienhard AG. Die untersuchte Restschlacke ist grau unterlegt.

Die Restschlacke fällt am jeweiligen Deponiestandort als entmetallisierter Aufbereitungsrest aus der mobilen Schlackenaufbereitungsanlage an. Das primäre NE-Metall wird laufend nach Degersheim zur Veredelung gebracht. Dort werden mineralische Verunreinigungen abgeschieden und die NE-Metalle <25 mm einer Dichtentrennung unterzogen. An Produkten werden verkauft: ein gereinigter NE-Mischschrott >25 mm an Schrottaufbereiter, Alu-Schrotte <25 mm an Alu-Remelter und NE-schwer-Schrotte an Kupferhütten. Die Abreinigungsrückstände aus der Metallveredelung werden laufend zum jeweiligen Deponiestandort zurückgebracht und den rohen Schlacken am Eingang der mobilen Aufbereitungsanlage zugemischt. Die Menge an rückgeführten Abreinigungsrückständen macht ca. 40 % der Masse der primären NE-Metalle aus. Nachdem der Rückstand aus der Metallveredelung im Prozess der primären Metallabscheidung behandelt wird, produziert die Aufbereitung der Gebr. Lienhard AG neben der Deponieschlacke keinen weiteren Abfall.

### 1.2.2 DHZ AG

Die DHZ AG betreibt am Deponiestandort Deponie Häuli in Lufingen eine stationäre Schlackenaufbereitungsanlage für die Primärabscheidung der Metalle aus zwischengelagerten Nassschlacken (Anlage supersort®). Verarbeitet werden Schlacken verschiedener Herkunft, und zwar gemischt. DHZ AG führt unternehmensintern am Standort Oberglatt eine Veredelung der NE-Metalle durch (Anlage supersort®metall). Die Flüsse von Schlacke, NE-Metall und Rückstand aus der Veredelung sind schematisch wie folgt:

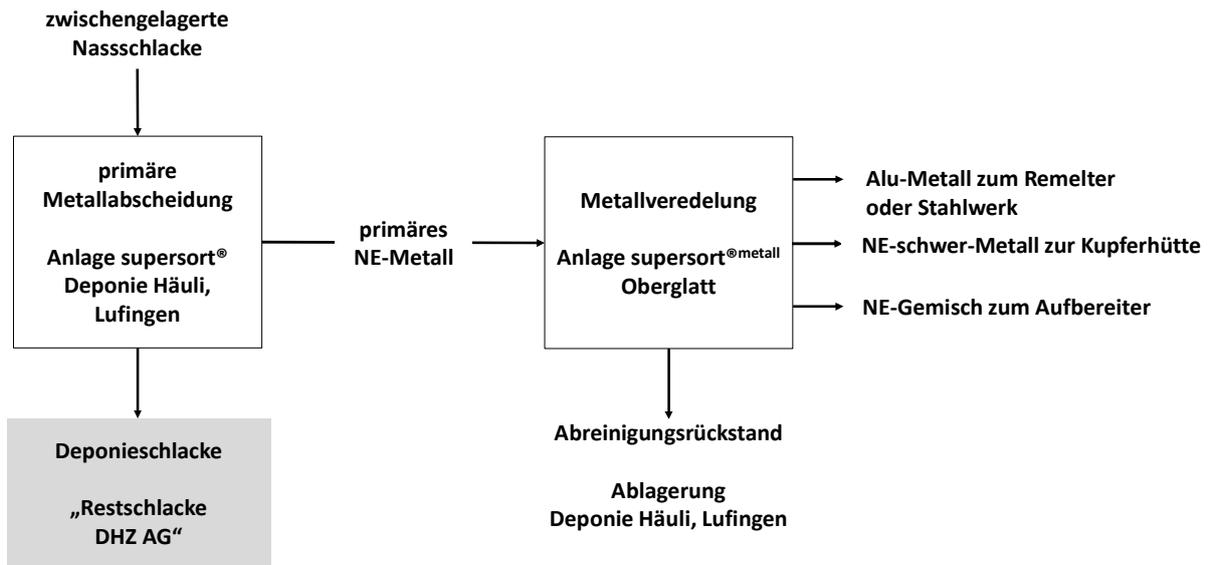


Abb. 2: Schlackenaufbereitung und Metallveredelung bei DHZ AG. Die untersuchte Restschlacke ist grau unterlegt.

Die Metallveredelung in Oberglatt erzeugt Alu- und NE-schwer-Schrotte, die an Alu-Remelter oder Stahlwerke (Aluminium als Desoxidationsmittel) bzw. Kupferhütten verkauft werden. Einzelne Fraktionen werden auch gemischt verkauft. Der Abreinigungsrückstand aus der Metallveredelung wird auf der Deponie Häuli abgelagert. Die Menge dieses Rückstands liegt in der Größenordnung von 40 % des primären NE-Metalls. Neben der untersuchten Restschlacke aus der Anlage supersort® in Lufingen fällt also noch dieser Reststoff an, der auf der Deponie Häuli abgelagert wird.

### 1.2.3 ZAV Recycling AG

Die ZAV Recycling AG bereitet ausschließlich trocken ausgetragene KVA-Schlacken auf. Die Primärabscheidung der Metalle und die Metallveredelung werden am selben Standort in Hinwil durchgeführt. Das Behandlungskonzept für die NE-Metalle ist wie folgt:

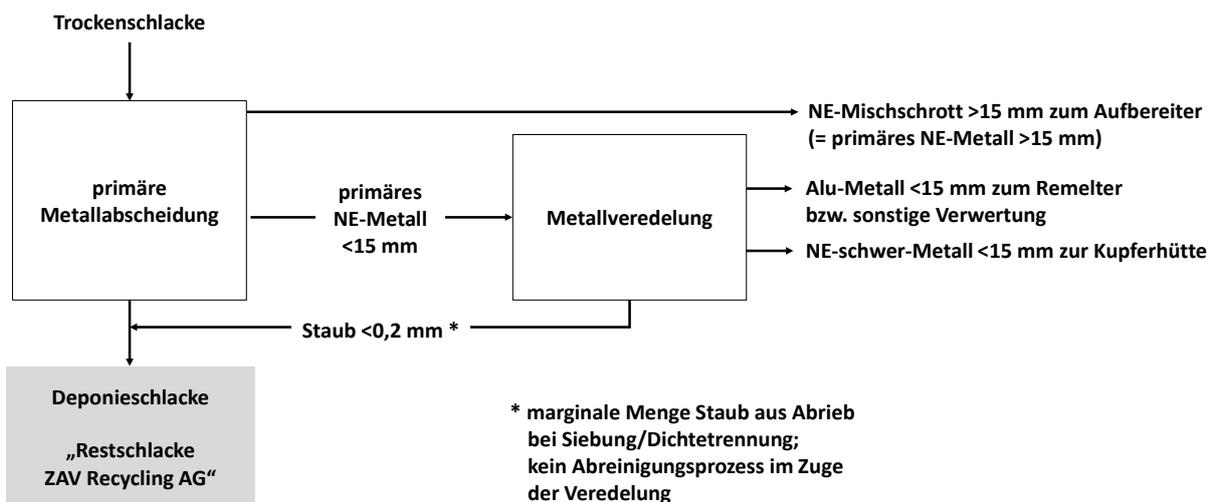


Abb. 3: Schlackenaufbereitung und Metallveredelung bei ZAV Recycling AG. Die untersuchte Restschlacke ist grau unterlegt.

Der NE-Mischschrott >15 mm wird direkt ab primärer Abscheidung an Schrottaufbereiter verkauft. Anders als bei den beiden Nassschlackenaufbereitern werden die NE-Metalle aus der primären

Metallabscheidung im Zuge der Veredelung nicht gereinigt. Die NE-Metalle <15 mm werden direkt einer Dichtentrennung unterzogen und die resultierenden Alu- und NE-schwer-Schrotte an Alu-Remelter bzw. Kupferhütten verkauft. (Anmerkung: Alu 0,2-1 mm zum Teil als Desoxidationsmittel oder für pyrotechnische Anwendungen z.B. THERMIT® Schweißen, Sprengmittel, Feuerwerkstechnik, fallweise mit Nachreinigung beim Abnehmer) Abreinigungsrückstände fallen bei der Veredelung in Hinwil nicht an, abgesehen von einer marginalen Menge Staub aus der Entstaubung der Siebanlagen, Trenntische und Fördereinrichtungen. Dieser Staub endet in der Restschlackenfraktion "Staub Innenaufbereitung", das heißt, in der untersuchten Deponieschlacke. Außer der untersuchten Deponieschlacke fallen bei der Aufbereitung der ZAV-Recycling AG keine weiteren Reststoffe an.

### **1.3 Vergleichbarkeit der Schlackenaufbereitungsanlagen**

Wegen der oben beschriebenen Unterschiede in den Aufbereitungskonzepten ist eine alleinige Betrachtung der primären Deponieschlacken unzureichend, um die Metallverwertung bzw. den Metallverlust insgesamt zu vergleichen (also der letztendlich relevante Verwertungsgrad bzw. Verlust über die ganze Behandlungskette von der rohen Schlacke bis zum Einsatz der fertigen Produkte als Sekundäraluminium bzw. als Produkte der Kupferhütte). Dazu müssten auch die NE-Metall-Gehalte der Rohschlacken, die Metallverluste bei allen Veredelungsprozessen und die Ausbeuten in den finalen, pyrometallurgischen Prozessen (Alu-Remelter, Kupferhütte) einbezogen werden.

### **1.4 Analysenmethoden**

Im Schlackenprojekt wurden an den Rohschlackenproben verschiedene Analysenmethoden angewendet, um die Gehalte an NE-Metallen auf differenzierte Art und Weise zu bestimmen. Diese Vorgangsweise sollte für die Restschlacken übernommen werden. Mit der ZAR-Methode können "freie" NE-Metalle, die mit der Wirbelstromabscheidetechnik direkt erfassbar sind, aus den Proben abgetrennt werden. Für die Restschlackenanalysen ist diese Methode interessant, weil alle drei Schlackenaufbereitungsanlagen die NE-Metalle mit der Wirbelstromabscheidetechnik abtrennen. Mit der ZAR-Methode kann daher bestimmt werden, welche Mengen an frei vorliegenden NE-Metallen bei der Schlackenaufbereitung ungenutzt geblieben sind. Mit der Bachema-Methode kann in den Probenresten nach der ZAR-Analyse der Anteil "eingeschlossener" Metalle bestimmt werden. Die eingeschlossenen NE-Metalle sind der Teil des Potentials, der nur zugänglich wird, wenn die Schlacke fein aufgebrochen wird. Schließlich kann mit der Wasserstoff-Methode der nach ZAR- und Bachema-Analyse im Probenmaterial zurückbleibende Rest an Alu-Metall <1 mm bestimmt werden. Die Summe aus allen drei Analysen gibt gute Näherungen für die NE-Metall-Gesamtgehalte der Restschlackenproben. (Anmerkung: Es fehlt darin das eingeschlossene NE-schwer-Metall 0,2-1 mm.)

Neben der ZAR-Analyse wurden die Bachema-Methode und die BAFU-Methode zum Vergleich eingesetzt. Mit der Bachema-Methode kann an originalen Restschlackenproben die Summe freier und eingeschlossener Metalle >1 mm bestimmt werden. Bei den Rohschlackenanalysen wurden leichte Minderbefunde mit der Bachema-Methode festgestellt, weil NE-Metallkörner bei der Bearbeitung zum Teil brechen und dadurch NE-Metall in die Probenrestfraktion <1 mm wandert. Für die Restmetallbestimmung aufbereiteter Schlacken ist daher ebenfalls ein Vergleich der Analysenmethoden vorgesehen worden.

Für die Beurteilung der Restmetallgehalte hinsichtlich des Grenzwerts für die Ablagerung auf Deponien ist die Bestimmung nach BAFU-Methode vorgeschrieben. Mit der BAFU-Methode (Methode F-23 im Methodenband des BAFU; BAFU, Hrsg. 2017) werden die Gehalte an NE-Metallen 2-16 mm in der Probenfraktion <16 mm bestimmt.

## 2 Zielsetzung

Das Ziel der Untersuchung war es, für die Restschlacken

- der Aufbereitung Gebr. Lienhard AG auf der Deponie Riet im Oktober 2022 mit Schlacke der KVA Winterthur,
- der Aufbereitung der DHZ AG im März 2023 mit Schlacke von Limeco vom Februar 2023 und
- der Aufbereitung der ZAV Recycling AG mit dem regulären Rohschlackeninput im März 2023

die Rest-NE-Metallgehalte zu bestimmen.

Als Analysemethoden sollten parallel zu Vergleichszwecken eingesetzt werden:

- die BAFU-Methode (durch Bachema AG, Schlieren),
- die Bachema-Methode (durch Bachema AG, Schlieren) und
- die ZAR-Methode (durch ZAR, Hinwil).

Außerdem sollten bei BAFU- und Bachema-Methode Nachsortierungen vorgenommen werden, um den VA-Stahl ("Chromstahl") aus den "NE"-Metallfraktionen zu entfernen und die Gehalte reiner NE-Metalle anzugeben. Bei allen Analysen sollten die Probenrückstände weiter untersucht werden, um möglichst gute Näherungswerte für die NE-Metallgesamtgehalte bestimmen zu können. Im Nachgang, im Zuge der Diskussion der Analysenergebnisse wurde beschlossen, die NE-Metallfraktionen der ZAR-Analysen einer Reinheitsbestimmung zu unterziehen, um die ZAR-Analyseergebnisse auch auf Basis reiner NE-Metalle angeben zu können.



### **3 Vorgangsweise**

Im Folgenden wird für die einzelnen Restschlacken beschrieben, wie die Proben gewonnen und für die Analysen bereitgestellt wurden. Die Beschreibungen der eigentlichen Analysenverfahren finden sich unter 3.4.

#### **3.1 Restschlacke Gebr. Lienhard AG, Deponie Riet, Winterthur**

Im September/Oktober 2022 war die mobile Aufbereitungsanlage der Gebr. Lienhard AG für ca. acht Wochen auf der Deponie Riet in Winterthur stationiert. Es wurden dort ca. 14 000 to zwischengelagerte Schlacke aus der KVA Winterthur aufbereitet. Während dieser Kampagne ist die Restschlackenmenge zweier aufeinanderfolgender Aufbereitungstage, das sind etwa 800 to, charakterisiert worden.

##### **3.1.1 Verarbeitete Schlacke**

Die auf der Deponie Riet zur Aufbereitung zwischengelagerte Schlacke stammte ausschließlich von der KVA Winterthur. Angeliefert worden ist diese Schlacke von Februar bis September 2022. Das Alter der Schlacke zum Zeitpunkt der Aufbereitung lag daher zwischen einigen Wochen bis ca. acht Monate. Wie alt genau die Schlacke war, die während der Probenahmetage aufbereitet wurde, ist unbekannt. Die Schlacke ist am Zwischenlager hoch aufgeschüttet worden und wurde beim Aufbereiten in einer hohen Front angegraben. Es ist daher wahrscheinlich, dass Schlacke unterschiedlichen Alters vermischt war.

Wie in 1.2.1 erläutert, werden während einer Aufbereitungskampagne die Rückstände aus der betriebsinternen Metallveredelung (vom Standort Degersheim) zur Deponie zurückgebracht und der rohen Schlacke zur nochmaligen Aufbereitung beigemischt. Die Mengen der Rückstände sind im Vergleich mit der Menge an verarbeiteter Rohschlacke gering. Vor der Probenahme (erster Probenahmetag: 5. Okt.) wurde am 20. September die letzte Menge an Rückständen (14 to) zur Deponie zurückgeliefert. Die erste Fuhr nach der Probenahme erfolgte am 11. Oktober. Die Rückstände werden immer großzügig in die zwischengelagerte, rohe Schlacke eingemischt, das heißt, sie werden über viele Tage nach der Anlieferung mitverarbeitet. Für die verarbeitete Schlacke an den Probenahmetagen ist nicht mehr bestimmbar, ob und gegebenenfalls wieviel Rückstände enthalten waren. (Anmerkung: Um bei einer Restschlackenprobenahme den richtigen Anteil an Veredelungsrückständen im Probenmaterial abzubilden, müsste ein längerer Probenahmezeitraum gewählt werden, der zumindest ein Lieferintervall der Rücktransporte abdeckt.)

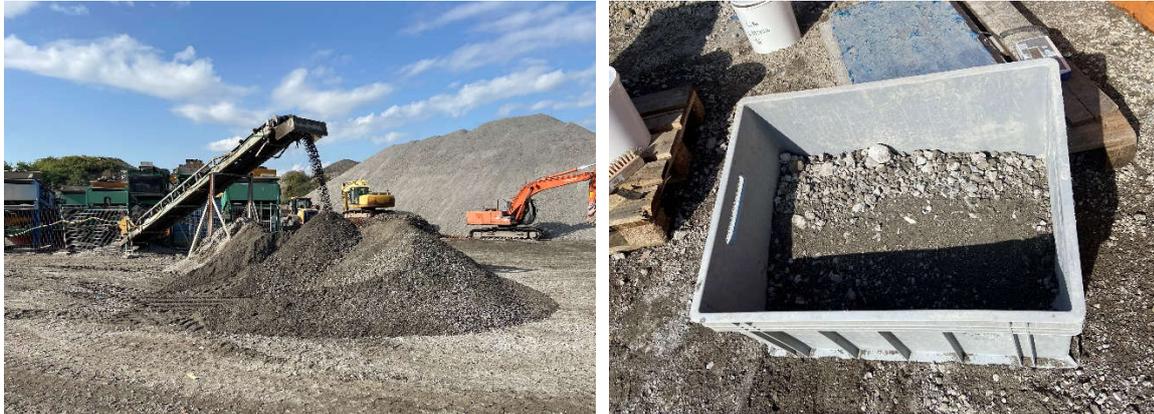
##### **3.1.2 Probenahme**

Die Probenahme wurde nach einer regenreichen Woche, in der die Aufbereitung zeitweise ruhte, am 5., 6. und 7. Oktober 2022 durchgeführt. Ursprünglich war geplant, 20 Inkremente über zwei Tage verteilt zu nehmen. Die Menge an Restschlacke, die durch die Untersuchung charakterisiert wurde, ist ca. 800 to. Durch einen Anlagenausfall am Nachmittag des 6. Oktober (Förderbandriss) konnte das 20. Inkrement am 6. Oktober nicht mehr genommen werden. Es wurde entschieden, die Entnahme am 7. Oktober in der Früh nachzuholen und die Probenteilung vor Ort erst danach zu beginnen. Die Entnahmezeiten für alle 20 Inkremente wurden mit einer Zufallskomponente über die Laufzeit zweier Arbeitstage verteilt, um nicht konstante Zeitintervalle zu verwenden.

##### **Probenahmestelle und Entnahmetechnik**

Das Probenmaterial wurde direkt am Abwurf des Austragsbandes der mobilen Anlage genommen. Alle Restschlackenfraktionen, die in der Aufbereitung anfallen, laufen gesammelt über dieses Band. Die Probenahmen wurden im laufenden Betrieb von IBS händisch mit einer großen Kunststoffbox durchgeführt. Die Entnahme wurde vom Probenehmer vor dem Beginn geübt, um eine gleiche

Entnahme bei allen Terminen sicherzustellen. Der Probenehmer trat jeweils mit der Box vor den fallenden Materialstrom (zu manchen Terminen auf dem Restschlackenhaufen) und führte von links die Box in die Sammelposition. Die Box war groß genug, um den Strom über seinen gesamten Querschnitt auffangen zu können. Nach jeweils drei Sekunden Sammeldauer wurde die Box nach rechts mit einem kräftigen Ruck (um gleiche Geschwindigkeit für das Ein- und Ausführen aus der Sammelposition zu erreichen) aus der Sammelposition gezogen. Jedes Inkrement wurde gewogen und das Probenmaterial in PE-Kessel abgefüllt.



*Abb. 4a und b: Probenahmestelle beim Bandabwurf des Restschlackenaustrags der mobilen Anlage der Gebr. Lienhard AG (links). Probenahme-Box mit einem Inkrement (rechts).*

### **Anzahlen und Massen**

Es war das Ziel, mit 20 Inkrementen eine primäre Probe von rund 750 kg zusammenzustellen, das heißt, im Schnitt ca. 37 kg je Inkrement zu sammeln. Tatsächlich wurden 833 kg gesammelt. Die primäre Probe wurde am 7. Oktober vor Ort durch inkrementierendes Schaufeln ("Auseinanderschaukeln", und zwar jeweils Halbieren) geteilt und die Teilmengen zum Trocken auf das Kesseldach der KVA Winterthur gebracht. Es wurde ein 1/2-Aliquot für die ZAR-Analysenvariante erzeugt (415 kg feucht), ein 1/8 (102,5 kg) für die Bachema-Analyse, ein 1/16 (50,55 kg) für die BAFU-Analyse sowie vom Rest noch weitere Achtel und Sechzehntel zum Rückstellen und zum Abgeben an Beteiligte.

### **3.1.3 Analysen**

Drei Analysenvarianten wurden an drei Teilmengen der primären Probe durchgeführt. Das Analysenprogramm ist in Tab. 1 angegeben.

Die getrockneten Proben für die Bachema- und BAFU-Variante wurden mit Massen von ca. 100 kg und 50 kg direkt von Bachema AG übernommen und analysiert. Die Probe der ZAR-Analysen-Variante wurde in mehreren Schritten bearbeitet, der Ablauf ist im Folgenden extra beschrieben.

Tab. 1: Analysenprogramm für die Restschlacke der Aufbereitung Gebr. Lienhard AG bei der Untersuchung im März 2023.

Pos.	Analysemethode	Probe ZAR-Variante	Probe Bachema-Variante	Probe BAFU-Variante
0	Vorbereitung: Aussiebung >16 mm	+		+
<b>1.0</b>	<b>ZAR-Methode, NE 0,2-16 mm</b>	+		
1.1	Reinheitsbestimmung der ZAR-NE-Metallfraktionen	+		
	<b>Rückstandsanalysen ZAR-Rückstände:</b>			
1.2	Bachema-Methode mit Nachsortierung, NE >16 mm von Pos. 0	+		-
1.3	Bachema-Methode mit Nachsortierung für NE 1-16 mm von Rückstand >1 mm aus 1.0* und Rückstand aus Pos. 1.2	+		
1.4	Wasserstoff-Methode, Al met <1 mm, Bachema-Rückst. <1 mm von Pos. 1.3	+		
1.5	Wasserstoff-Methode, Al met <1 mm aufber. Schlacke 0,2-1 mm von Pos. 1.3	+		
1.6	Wasserstoff-Methode, Al met <1 mm magn. Schlacke 0,2-1 mm von Pos 1.3	+		
1.7	Wasserstoff-Methode, Al met <0,2 mm Schlackenstaub <0,2 mm von Pos. 1.3	+		
<b>2.0</b>	<b>Bachema-Methode, "NE" 1-16 mm</b>		+	
2.1	Nachsortierung Metalle 1-16 mm		+	
	<b>Rückstandsanalyse Bachema-Rückstand:</b>			
2.2	Wasserstoff-Methode, Al met <1 mm von Pos. 2.0		+	
<b>3.0</b>	<b>BAFU-Methode, "NE" 2-16 mm und 1-16 mm **</b>			+
3.1	Nachsortierung Metalle 1-16 mm			+
	<b>Rückstandsanalyse BAFU-Rückstand:</b>			
3.2	Wasserstoff-Methode, Al met <1 mm von Pos. 3.0			+

\* umfasst folgende ZAR-Rückstände: aufbereitete Schlacke 5-16 mm und 1-5 mm und magnetische Schlacke 1-5 mm, sowie Rückstand <16 mm von 1.2

\*\* Bestimmung auch NE 1-2 mm zusätzlich zur Originalmethode

### Ablauf der Analyse in der ZAR-Variante

Das Ziel dieser Analysenvariante war es, die NE-Metalle, die mit der Wirbelstromabscheidetechnik aus dem originalen, unveränderten (insbesondere nicht zerkleinerten) Probenmaterial abscheidbar waren, extra zu erfassen. Aus diesem Grund wurde anders als bei den Rohschlackenanalysen des Schlackenprojekts die Fraktion >16 mm abgetrennt und separat gehalten. Nur die Probenfraktion <16 mm wurde zur ZAR-Analyse gebracht (siehe Ablaufschema in Abb. 8). In der Fraktion >16 mm wurden die Metalle >16 mm konventionell durch Brechen, Aussieben und Sortieren erfasst. Der auf <16 mm zerkleinerte Rest der Fraktion >16 mm wurde mit den Rückständen >1 mm aus der ZAR-Analyse (Beschrieb unter 3.4.3) zu einer Rückstandsprobe vereint. Diese Rückstandsprobe wurde bei Bachema AG mit der Bachema-Methode (siehe 3.4.1) auf Rest-Metalle analysiert. Die Metallfraktionen aus dieser Analyse wurden auch noch durch IBS nachsortiert. Die Bachema-Analyse dieser Rückstände mit der Nachsortierung diente dem Zweck, das NE-Metall >1 mm, das in Schlacke eingeschlossenes Metall darstellt, zu erfassen. Sämtliche Probenrückstände <1 mm wurden mit der Wasserstoff-Methode noch auf die Gehalte metallischen Aluminiums gemessen.

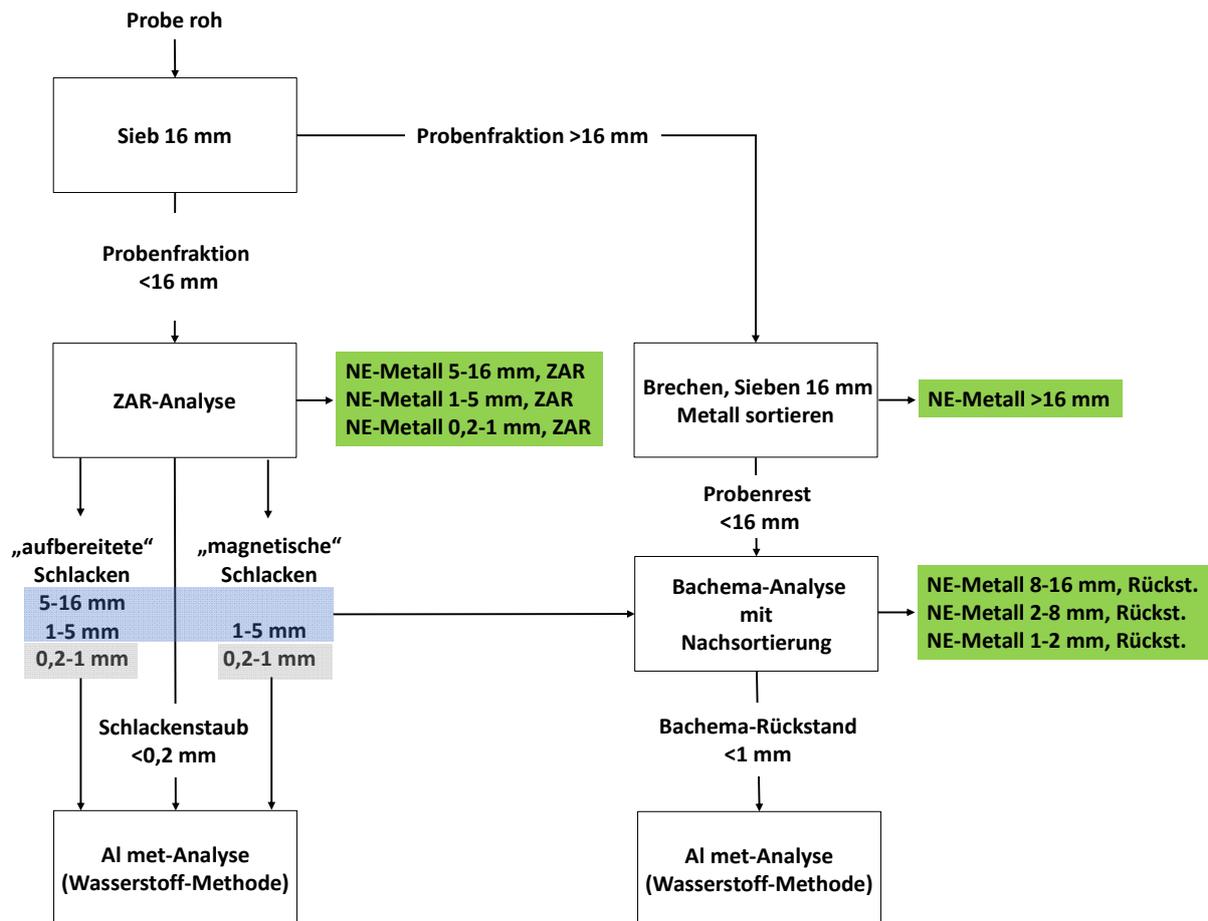


Abb. 5: Ablaufschema der Analysenvariante mit ZAR-Analyse.

### 3.2 Restschlacke DHZ AG, Lufingen (Limeco Schlacke)

Die DHZ AG verarbeitet üblicherweise ein Gemisch aller angelieferten Schlacken, um den Input zu vergleichmäßigen. Das heißt, die Schlacken werden nicht in Chargen getrennt nach Lieferanten verarbeitet. Aus Interesse von Limeco und DHZ AG wurde für den Versuch aber eine Charge reiner Limeco-Schlacke zusammengestellt.

#### 3.2.1 Verarbeitete Schlacke

Im Februar 2023 ist die komplette Schlacke von Limeco an DHZ AG geliefert und zu einer Charge von frisch angeliefert 1 016 to zusammengestellt worden. Organisiert, inklusive Logistik wurde der Aufbau der Charge durch Limeco und DHZ AG. Die Charge wurde vom Zwischenlager auf der Deponie ca. eine Woche vor der Aufbereitung in die Halle verbracht.

Insgesamt wurden 1 093 to bei der Untersuchung verarbeitet. Berücksichtigt man den Trocknungsverlust, so ist anzunehmen, dass vom Untergrund des Zwischenlagers auf der Deponie fremde Schlacke im Ausmaß von ungefähr 10 % beim Transport in die Halle in die Limeco-Schlacke eingemischt wurde. Das Material war beim Aufbereiten nicht staubtrocken, aber weit aufgetrocknet. (Anmerkung: Die Restschlacke musste am Abwurf des Austragsbandes mit Wasser besprüht werden, um Staubemissionen zu reduzieren.)



Abb. 6: Die Charge der Limeco Schlacke in der Halle der DHZ AG vor der Aufbereitung.

### 3.2.2 Aufbereitung der Charge und Probenahme

Die Schlackencharge wurde am Mittwoch, 22. März und Donnerstag, 23. März 2023 (KW 12) aufbereitet. Die Laufzeit war länger als ursprünglich geplant, weil die Aufbereitung mit 70-75 t/h Durchsatz gefahren wurde und nicht wie ursprünglich geplant mit 80-90 t/h. DHZ AG gab an, dass die Limeco-Schlacke (auch üblicherweise) feiner ist als der im Routinebetrieb aufbereitete Schlacken-Mix. Der Durchsatz musste daher zurückgenommen werden, weil sonst die Aufbereitungslinie für die Feinschlacke überfahren worden wäre. Insgesamt ergab sich eine Laufzeit von ca. 15 Stunden.

#### Probenahmestelle und Entnahmetechnik

Das Probenmaterial wurde an der Abwurfstelle des Austragsbandes zur Deponie genommen. Ein Mitarbeiter der DHZ AG erledigte nach Einweisung durch IBS die Probenahme mit dem Radlader und einem Container ("Handling-Container").

Zum Sammeln eines Inkrements wurde der Handling-Container jeweils mit dem Radlader für acht Sekunden unter die Abwurfstelle geführt. Auf Grund der Platzverhältnisse kann eine 'korrekte' Entnahme laut Probenahmetheorie (vergl. dazu die Kriterien z.B. in Gy, 1992) an dieser Stelle nicht durchgeführt werden, weil Platz fehlt, um den Container in der gleichen Bewegungsrichtung, also "auf der anderen Seite" aus der Sammelposition zu bewegen. Der Behälter wurde von links in Förderrichtung des Bandes in die Sammelposition gebracht und auf der gleichen Seite wieder herausgezogen. Durch diese Vorgangsweise ist bei der Probenahme das Material, das auf der linken Seite des Bandes (in Förderrichtung gesehen) liegt, bevorzugt. Um den Fehler so klein wie möglich zu halten, wurde der Container jeweils in rascher Fahrt in die Sammelposition gebracht, das heißt, die Schnittkante (= Containerkante) durchfuhr mit sehr hoher Geschwindigkeit den Materialstrom. Durch die große Länge des Handling-Containers konnte auch beim Herausfahren eine hohe Geschwindigkeit erreicht werden, weil genug Beschleunigungsstrecke zur Verfügung stand, bis die Schnittkante den Strom erreichte. Insgesamt ist zu schätzen, dass die Differenz in der Sammeldauer zwischen Material vom linken und rechten Rand des Förderbandes bei einer Sammeldauer von je acht Sekunden nur wenige zehntel Sekunden ausmachte. Das heißt, das Material vom linken äußeren Rand ist in den Proben um einige wenige % überrepräsentiert, das vom rechten Rand unterrepräsentiert. Dieser leichte systematische Fehler wird für die gegenständliche Untersuchung als nicht relevant eingestuft.



*Abb. 7a und b: Probenahmestelle beim Bandabwurf auf der Deponie (links). Probenahme mittels Radlader und Handling-Container (rechts).*

Die Restschlacke musste am Abwurf mit Wasser besprüht werden, um Staubemissionen zu reduzieren. Wie in der Abb. 7a zu sehen ist, haftete dadurch ein Teil der Schlacke am Band und fiel erst beim Abstreifer ab (dünner, senkrechter Strahl rechts vom Hauptstrahl). Der Handling-Container war breit genug, um auch den Materialstrom vom Abstreifer vollständig zu erfassen. Unter dieser Voraussetzung wurden die Entnahmen bei laufender Besprühung der Schlacke vorgenommen, um am Austrag die Bedingungen für das Anhaften der Schlacke konstant zu halten.

Die Inkremente wurden jeweils aus dem Handling-Container in eine Garette geschaufelt und darin gewogen. Alle Inkremente wurden vor Ort in einer sauber ausgekehrten Lagerbucht auf einen Haufen aufgeschüttet.

### **Anzahlen und Massen**

Es war das Ziel, eine einzige Probe aus ca. 20 Inkrementen (Einzelentnahmen) zusammenzustellen. Mit dem ursprünglich als Planungsgrundlage benutzten Durchsatzwert von 80-90 to/h waren ca. 10 Stunden Laufzeit zu erwarten. Es wurde daher ein Zeitintervall zwischen den Inkrementen von ca. einer halben Stunde festgesetzt. Durch die begrenzte Verfügbarkeit des Laders ergaben sich von selbst gewünschte Abweichungen vom Halbstundenintervall. Die Sammeldauer von acht Sekunden wurde gewählt, um den systematischen Fehler bei der Entnahme (linke Bandseite bevorzugt; siehe die Erläuterung unter „Probenahmetechnik“ oben) klein zu halten. Durch die lange Sammeldauer wurde sehr viel mehr primäres Probenmaterial gesammelt als gebraucht. In der folgenden Tabelle ist die primäre Menge angegeben sowie die Mengen, die für die Analysen verwendet wurden, bzw. sonstige Mengen.

Tab. 2: Probenmengen bei der Probenahme bei DHZ AG und der Probenteilung des noch feuchten Materials vor Ort.

<b>primäre Probe</b>		
<b>Zielwerte</b>		
20 Inkremente zu je ca. 200 kg, total 4 000 kg		
<b>Ist-Werte</b>		
29 Inkremente zu durchschnittlich ca. 129 kg, total 3 732 kg		
<b>Teilmengen der primären Probe, feucht, Teilung vor Ort</b>		
<b>Verworfenen Menge (3/4)</b>	<b>ZAR-Analyse (1/8)</b>	<b>Teilmenge für sonst. Analysen und Rückstellmengen (1/8)</b>
2 739 kg	473 kg	477 kg

Das ursprünglich festgesetzte Probenahmeintervall von ca. einer halben Stunde wurde beibehalten. Durch die längere Laufzeit ist eine wesentlich größere Zahl an Inkrementen genommen worden (29 Stück). Wegen des geringeren Durchsatzes und damit verbunden der geringeren Inkrementmassen wurde die ursprüngliche Zielmasse trotzdem ungefähr getroffen (3,7 to statt 4 to).

Das primäre Probenmaterial wurde vor Ort zweimal durch inkrementierendes Schaufeln auf Hälften geteilt, wobei jeweils eine Hälfte verworfen wurde. Das restliche Viertel wurde noch einmal auf gleiche Weise halbiert. Eines dieser Achtel war für die ZAR-Analyse bestimmt. Dieses wurde zur KVA Winterthur gebracht und dort auf dem Kesseldach getrocknet. Das zweite Achtel wurde auf dem Kesseldach bei Limeco getrocknet. Diese Menge wurde erst im trockenen Zustand für die Analysen bei Bachema (1/32 für Bachema-Analyse, ca. 100 kg; 1/64 für BAFU-Analyse, ca. 50 kg) sowie für Teilmengen, die an Beteiligte übergeben wurden, und Rückstellmengen weiter geteilt.

### 3.2.3 Analysen

Das Analysenprogramm für die Restschlacke von DHZ AG ist gleich jenem für die Restschlacke der Aufbereitung Gebr. Lienhard AG, siehe 3.1.3. Die Vorgehensweisen bei den Analysen sind ebenso gleich, die dazu verwendeten Probenmassen ähnlich.

## 3.3 Restschlacke ZAV Recycling AG, Hinwil

Die ZAV Recycling AG verarbeitet die Schlacke der KEZO und per Container angelieferte Schlacken anderer KVA mit Trockenaustrag bzw. Hybridaustrag (KEBAG, Zuchwil). Eine chargenweise Aufbereitung von Schlacken einzelner KVA ist nicht möglich, da die Anlage intern über sehr große Puffer verfügt und ursprünglich grobes Material längere Durchlaufzeiten hat als feines. Der aktuelle Output setzt sich daher jeweils aus Material zusammen, das sich aus mehreren Tagen Inputmenge vermischt. Der Probenahmezeitraum wurde nicht mit Rücksicht auf die Herkünfte und Mengen der verarbeiteten Schlacken gewählt, sondern nach organisatorischen Gesichtspunkten.

### 3.3.1 Verarbeitete Schlacke

Die im Beprobungszeitraum behandelte Schlacke war eine Mischung von Rohschlacken der KEZO, KVA Horgen und ERZ in folgendem Massenverhältnis:

Tab. 3: Herkunft und Mengen der verarbeiteten KVA-Schlacken im Probenahmezeitraum der Restschlackenuntersuchung KW 12, 2023.

Herkunft	Menge	
	[t]	[% von Summe]
KEZO	408	29
KVA Horgen	74	5
ERZ	931	66
Summe	1413	

Schlacke von SATOM (Monthey) fehlte im Untersuchungszeitraum wegen des Anlagenausfalls nach dem Brand. Feinschlacke von KEBAG (Zuchwil) wurde auf Beschluss der Projekt-Begleitgruppe in der Versuchswoche nicht verarbeitet, sondern im Containerlager gepuffert.

### 3.3.2 Probenahmezeitraum

Die Probenahme wurde in KW 12 durchgeführt. Der Untersuchungszeitraum startete mit Mo, 20. März um 0 Uhr und endete am So, 26. März um 24 Uhr.

Eine Woche wurde für die Anlage der ZAV Recycling AG als die kürzest mögliche Untersuchungsdauer angesehen. Der Grund dafür liegt im Anlagenkonzept. Es werden einzelne Korngrößenklassen zwischengepuffert und nicht kontinuierlich verarbeitet. Beispielsweise wird die Grobschlacke >80 mm jeweils montags, mittwochs und freitags verarbeitet und gelangt dabei über einen Brecher in die nächste Verarbeitungsstufe. Bei kürzeren Untersuchungszeiträumen steigt die Wahrscheinlichkeit stark an, dass nicht alle Schlackenbestandteile am Restschlackenaustrag im richtigen Ausmaß erfasst werden, beispielsweise der Anteil aus der Grobschlacke, der nur dreimal pro Woche über den Brecher fließt und je nach Füllstand der Zwischenpuffers-Silos früher oder später in den Restschlackenfraktionen erscheint.

### 3.3.3 Beprobte Materialströme

Ab ZAV Recycling AG werden im Normalbetrieb aus den einzelnen Restschlackenfraktionen Reststoffe mit verschiedenen Qualitäten gemischt und abtransportiert. Das Material wird beim Verladen angefeuchtet. Die einzelnen Restschlackenfraktionen, die bei der Aufbereitung entstehen, wurden daher separat beprobt. Es sind das die folgenden Fraktionen:

- (1) aufbereitete Schlacke 1-15 mm,
- (2) aufbereitete Schlacke 0,2-1 mm,
- (3) magnetische Schlacke 0,2-15 mm,
- (4) Schlackenstaub <0,2 mm, Triage und
- (5) Schlackenstaub <0,2 mm, Innenaufbereitung.

Der Schlackenstaub Triage kommt aus der Eingangssiebung der Schlackenaufbereitung (primärer Schlackenstaub), während der Staub Innenaufbereitung während der Aufbereitung anfällt, z.B. beim Brechen der groben Schlackenfraktionen und generell als Abrieb. Die Stäube tragen keine relevanten Frachten rückgewinnbarer Metalle, maximal Litzendrähte, die durch das Sieb schlüpfen. Es wurde trotzdem vorgesehen, die Stäube zu beproben, um das metallische Aluminium darin zu messen. (Anmerkung: Auch bei den Restschlacken von DHZ AG und Gebr. Lienhard AG wurde das metallische Aluminium im Feinstkorn gemessen.)

### **3.3.4 Probenahmestellen und -techniken**

Alle Probenahmestellen, mit Ausnahme der Probenahmestelle des Triage-Staubes befinden sich auf den Förderstrecken zu den Restschlacken-Silos. Der Triage-Staub kann direkt ab Ausgang Triage-Sieb beprobt werden.

Die Proben von den beiden aufbereiteten Schlacken, der magnetischen Schlacke und dem Staub aus der Innenaufbereitung wurden an Bandabwürfen genommen, dort wo die Sammelbänder das Material zu den Reststoff-Silos befördern. Die Bänder sind gekapselt. Es gibt Zugriffsmöglichkeiten durch Luken und ein eigenes Werkzeug ("Löffel"), mit dem durch die Luken die Inkremente aus dem fallenden Materialstrom am Abwurf gesammelt werden können. Zur Probenahme wird das Sammelwerkzeug jeweils mit nach unten gerichteter Öffnung nach hinten durch den Strom geführt (um noch nichts zu sammeln), dann umgedreht und mit einer gleichmäßigen Bewegung nach vorne durch den Strom herausgeführt (eigentlicher Entnahmevergung). Die Bewegung muss zügig erfolgen, damit das Sammelgefäß nicht überfüllt wird. Bei den ersten Entnahmetermenen wurden die genauen Handgriffe zur Entnahme unter allen Probenehmern abgestimmt, um eine zum aktuellen Materialstrom jeweils circa mengenproportionale Entnahme zu gewährleisten. Das Probenehmen wurde vor den eigentlichen Entnahmen von allen Probenehmern geübt. Nachdem das Probenahmewerkzeug ("Löffel") nur eine kleine Menge Material aufnehmen kann, wurden je Entnahmetermine mehrere bzw. viele Löffel zu einem Inkrement zusammengesetzt. Die Anzahlen sind in der Tab. 4 angegeben.

Der Schlackenstaub von der Triage wurde direkt unter den Triage-Sieben beprobt, dort wo die Förderschnecke den Staub in den senkrechten Schacht zur pneumatischen Fördereinrichtung schiebt. Für die Entnahme wurde ein Gefäß angefertigt, das an die Rundung des Schachts angelegt werden kann, um das herabfallende Material vollständig aufzufangen. Nachdem die Schnecke schubförmig fördert, konnte das Gefäß jeweils zwischen zwei Schüben in und aus der Sammelposition gebracht werden. Das heißt, der Materialstrom musste nie mit der Gefäßkante durchfahren werden.

### **3.3.5 Probenzahlen und Mengen**

Es wurde von jeder Restschlackenfraktion jeweils nur eine Probe erzeugt. Jede Probe sollte aus ca. 50 Inkrementen zusammengesetzt sein, wobei bei einem Entnahmetermine alle Restschlackenfraktionen beprobt werden sollten. Die hohen Inkrementzahlen waren notwendig, weil systembedingt die Restschlacke von Stunde zu Stunde verschieden sein kann: Es variieren die Anteile "primärer" Feinschlacke <15 mm, die direkt aus dem Material der Eingangssiebung resultiert, und "sekundärer" Feinschlacke <15 mm aus der Zerkleinerung größerer Schlacke. Dieser Umstand liegt darin begründet, dass nicht alle Anlagenteile immer laufen, sondern die grobe Schlacke phasenweise gebrochen wird, das heißt, phasenweise als sekundäre Feinschlacke in die Puffersilos fließt.

Das Abarbeiten der verschiedenen Schlackenfraktionen richtet sich nach den Füllständen der Puffersilos und läuft automatisch. Durch eine hohe Inkrementzahl und eine lange Probenahmeperiode ist gewährleistet, dass sich in den Proben von selbst das richtige Verhältnis aus primärer und sekundärer Feinschlacke einstellt und beim Beprobieren keine Rücksicht auf den Betriebszustand genommen werden muss. Nachdem allerdings nicht alle Anlagenteile immer laufen, fließen auch an den Probenahmestellen die Restschlackenströme nicht immer. Um trotzdem eine zufällige Verteilung der Entnahmetermine einhalten zu können, wurde ein Entnahmezeitplan mit einer erhöhten Zahl an Terminen erstellt, um trotz etwaiger "leerer" Entnahmen (bei Stillstand des Anlagenteiles) auf die angestrebte Anzahl an Inkrementen zu kommen, ohne dass Entnahmetermine verschoben werden müssen. Ursprünglich wurden 60 Termine festgelegt. Die Mengenschätzung, das heißt, Laufzeitschätzung für die KW 12 stellte sich allerdings als zu optimistisch heraus, daher wurde am ersten Tag der Probenahmewoche der Plan abgeändert und es wurden 10 weitere Termine

verteilt über die Tage 2-7 aufgenommen. Die schlussendlich gesammelten Probenmengen sind wie folgt:

*Tab. 4: Zielwerte und realisierte Anzahlen an Inkrementen und Probenmassen bei der Restschlackenprobenahme bei ZAV Recycling AG in KW 12, 2023.*

		aufbereitete Schlacke 1-15 mm	aufbereitete Schlacke 0,2-1 mm	magnetische Schlacke 0,2-15 mm	Staub Triage <0,2 mm	Staub Innenaufb. <0,2 mm
<b>Anzahl Proben</b>	[1]	1	1	1	1	1
<b>Zielwerte</b>						
Anzahl Inkremente je Probe	[1]	ca. 50	ca. 50	ca. 50	ca. 50	ca. 50
Probenmasse insgesamt	[kg]	600	65	210	30	30
<b>Probenahme je Inkrement:</b>						
Anzahl Entnahmen je Termin	[1]	40 Löffel	8 Löffel	30 Löffel	4 Schübe	2 x 3 sec
<b>Ist-Werte</b>						
Anzahl Inkremente je Probe	[1]	39	38	39	66	41
Probenmasse insgesamt	[kg]	663	47	306	120	53
<b>Aliquote verwendet für:</b>						
ZAR-Analyse	[kg]	221 (1/3)	35,2 (3/4)			
Bachema-Analyse	[kg]	41,2 (1/16)		39,1 (1/8)		
BAFU-Analyse	[kg]	41,0 (1/16)		39,9 (1/8)		

Die angestrebte Zahl an Inkrementen wurde deutlich unterschritten. Der Zielwert von 50 Inkrementen wurde allerdings mit einem deutlichen Aufschlag festgesetzt, sodass die Proben bestehend aus 38 oder 39 Inkrementen immer noch eine hohe Sicherheit bieten. (Anmerkung: Dämpfung der Probenahmestreuung auf etwas unter ein Sechstel gegenüber einem Siebentel bei 50 Inkrementen.) Die Zielmassen wurden mittelmäßig gut getroffen, jedenfalls stand aber von allen Restfraktionen genügend Probenmaterial zur Verfügung.

Die Proben je Restschlackenfraktion wurden durch inkrementierendes Schaufeln ("Auseinanderschaukeln") geteilt. In der Tab. 4 sind auch die Mengen bzw. in Klammer die Teilungsverhältnisse zur Originalmasse angegeben, die für die Analysen benutzt wurden. Neben den in der Tabelle angegebenen Mengen sind jeweils weitere Teilmengen als Rückstellmengen und zum Übergeben an Beteiligte für eigene Analysen gebildet worden.

### 3.3.6 Analysen

Die Proben der Restschlackenfractionen von ZAV Recycling AG konnten jeweils ohne Probenaufbereitung direkt für die Analysen eingesetzt werden. Der Analysenplan war wie folgt:

Tab. 5: Analysenprogramm für die Restschlacke der ZAV Recycling AG bei der Untersuchung im März 2023.

Pos.	Analysemethode	aufbereitete	aufbereitete	magnetische	Staub	Staub
		Schlacke 1-15 mm	Schlacke 0,2-1 mm	Schlacke 0,2-15 mm	Triage <0,2 mm	Innenaufb. <0,2 mm
<b>1.0</b>	<b>ZAR-Methode, NE 1-16 mm</b>	+				
1.1	Reinheitsbestimmung ZAR-NE-Metalle von Pos. 1.0	+				
	<b>Rückstandsanalyse ZAR-Rückstand:</b>					
1.2	Bachema-Methode für Probenrückstände >1 mm aus Pos. 1.0, NE 1-16 mm mit Nachsortierung	+				
1.3	Wasserstoff-Methode für Rückstand <1 mm aus Pos. 1.2, Al met <1 mm	+				
<b>1.4</b>	<b>ZAR-Methode, NE 0,2-1 mm</b>		+			
1.5	Reinheitsbestimmung ZAR-NE-Metall von Pos. 1.4		+			
	<b>Rückstandsanalyse ZAR-Rückstand:</b>					
1.6	Wasserstoff-Methode für Rückstand <1 mm aus Pos. 1.5, Al met <1 mm		+			
<b>2.0</b>	<b>Bachema-Methode, NE 1-16 mm</b>	+		+		
2.1	Nachsortierung der Metallfraktionen aus Pos. 2.0	+		+		
	<b>Rückstandsanalyse Bachema-Rückstand:</b>					
2.2	Wasserstoff-Methode für Rückstand <1 mm aus Pos 2.1, Al met <1 mm	+		+		
<b>3.0</b>	<b>BAFU-Methode, NE 1-16 mm</b>	+		+		
3.1	Nachsortierung der Metallfraktionen aus Pos. 3.0	+		+		
	<b>Rückstandsanalyse BAFU-Rückstand:</b>					
3.2	Wasserstoff-Methode für Rückstand <1 mm aus Pos 3.1, Al met <1 mm	+		+		
4.0	Wasserstoff-Methode, Al met <0,2 mm				+	+

### 3.4 Analysenmethoden

Im Folgenden sind die Analysenmethoden beschrieben, die für alle Restschlacken in gleicher Art und Weise angewendet wurden. Die Proben von ZAV Recycling AG konnten in Folge des trockenen Zustands und der Körnung <15 mm jeweils direkt eingesetzt werden. Die Proben der Restschlacken von Gebr. Lienhard AG und DHZ AG wurden auf den Kesseldächern von KVA Winterthur und Limeco getrocknet und für die ZAR-Analyse wie unter 3.1.3 beschrieben vorbereitet.

#### 3.4.1 Bachema-Analyse mit Nachsortierung der Metalle und Rückstandsanalyse

Die Bachema-Methode wurde von der Bachema AG, Schlieren auf Grundlage der BAFU-Methode entwickelt und im Zuge des Schlackenprojekts leicht modifiziert (bezüglich der Probenteilung). Zweck der Bachema-Methode ist es üblicherweise, die gesamte Probe ohne Korngrößeneinschränkung zu analysieren und gleichzeitig einen Probenrückstand <1 mm zu erzeugen, der für eine Feinaufmahlung zur chemischen Analyse geeignet ist. (Anmerkung: Vorgangsweise, die im "Schlackenmonitoring" bisher eingesetzt wird.) In der gegenständlichen Analyse wird eine Nachsortierung der Metallfraktionen vorgenommen und das metallische Aluminium im Probenrückstand <1 mm

gemessen. Die eigentliche Bachema-Analyse wurde von Bachema AG durchgeführt, die Nachsortierung und Rückstandsmessung von IBS.

### **Bachema-Methode**

Bei der Bachema-Methode wird im Gegensatz zur BAFU-Methode immer das ganze Korngrößenspektrum der Probe eingesetzt. Das Probenmaterial wird stufenweise im Backenbrecher gebrochen und die unzerkleinerbaren Bestandteile, das sind Metalle und Unverbranntes, werden ausgesiebt bzw. in den ersten beiden Stufen auch ausgeklaubt. Das Probenmaterial wird jeweils so oft über den Brecher geführt, bis nur noch unzerkleinerbare Bestandteile als Überkorn vorliegen. Das zerkleinerte Probenmaterial wird dann geteilt und die Metallabtrennung der nächsten Korngrößensstufe begonnen. Das Ablaufschema über alle vier Bearbeitungsstufen ist in Abb. 8 aufgezeichnet. Die ausgesiebten, unzerkleinerbaren Bestandteile werden mit einem Magneten sortiert, um das Fe-Metall als eigene Fraktion zu bilden. Aus dem Rest werden unverbrannte Komponenten (Kunststoffe, Gummi, Holz, etc.) ausgelesen. Es bleibt die "NE"-Metallfraktion, die neben NE-Metallen auch VA-Stahl enthält.

Die Probenteilung mit fixen Verhältnissen ist eine Veränderung gegenüber der bisherigen Vorgangsweise. So wie bei der BAFU-Methode wurden bisher fixe Einwaagen (z.B. 5 kg und 2,5 kg) für die jeweils nächste Aufbereitungsstufe verwendet, das heißt, bei der Probenteilung musste zum Teil löffelweise Probenmaterial aus der Teilprobe in den Teilungsrest gegeben werden, oder umgekehrt, aus dem Teilungsrest Material in die Teilprobe zurückgegeben werden, um die gewünschte Einwaage zu erreichen. Diese Vorgangsweise ist problematisch, sie entspricht nicht den Prinzipien der "korrekten Probenahme". Mit der neuen Probenteilung geschieht die Probenteilung ausschließlich mit dem Riffelteiler. Das Probenmaterial wird vor dem Teilen außerdem noch in sich gemischt, damit Häufungen von Metallteilchen aufgelöst werden. Es ist nämlich wahrscheinlich, dass in der zu teilenden Probe metallreiche Portionen zuoberst liegen, weil die Absiebungen nach den jeweils letzten Brecherdurchläufen besonders metallreich sind (metallisches Bruchkorn).

### **Nachsortierung der Metalle**

Bei der Bachema- und BAFU-Analyse wird der VA-Stahl nicht beachtet. Das meiste davon befindet sich letztlich in der NE-Metall-Fraktion. Dünne Blechteilchen können aber auch in die Fe-Fraktion gelangen. Andere Metallteilchen, besonders solche aus weichem Aluminium weisen oft aufgepresste Staubschichten auf, die schwach magnetisch sind. In der Bearbeitungsstufe 2-8 mm und besonders 1-2 mm gelangen daher auch "magnetisch verunreinigte" Alu-Plättchen sehr leicht in die Fe-Fraktion. Um eine reine NE-Metallfraktion zu erhalten, wurden deshalb die Metalle der Bachema-Analyse nachsortiert und bei Bedarf gereinigt.

Zur Nachsortierung wurde zuerst jeweils die Fe-Fraktion nachsortiert. Alle an Magnetismus, Farbe und Form erkennbaren VA-Stahlteile wurden dabei separiert und nur die stark ferromagnetischen Teilchen zur neuen Fe-Fraktion gegeben. Alle sonstigen schwach ferro-magnetischen Teilchen wurden gemeinsam mit der originalen "NE"-Metallfraktion gewaschen. Beim Waschen mit verdünnter Alu-Beize (ca. 2 min in der Beize schwenken) schwimmt auch Unverbranntes auf, das beim Spülen mit frischem Wasser ausgeschwemmt werden kann. Das gewaschene Metall wurde dann jeweils mit Aceton dreimal nachgespült, um es schnell zu trocknen.

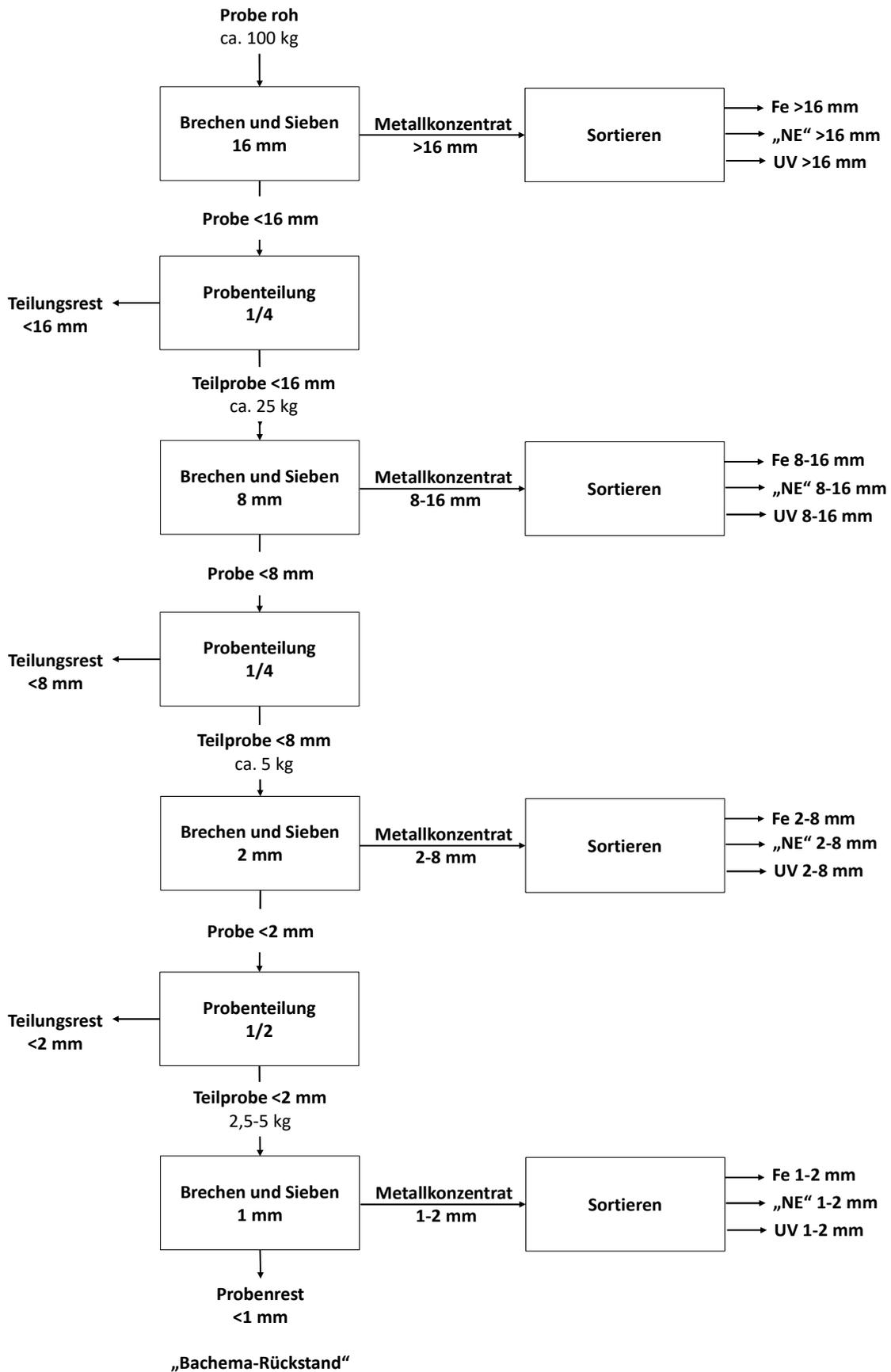


Abb. 8: Ablaufschema der Analyse nach Bachema-Methode. Angegebene Massen beziehen sich auf die Proben von Restschlacke Gebr. Lienhard AG bzw. DHZ AG. (Fe...Eisenmetall, "NE"...Gemenge aus NE-Metall und VA-Stahl, UV...Unverbranntes)

Aus den gewaschenen Metallfraktionen wurden dann jeweils noch mineralische Körner aussortiert und mit einem Nd-B-Magneten alle schwach ferromagnetischen Teilchen herausgezogen. (Anmerkung: das sind sehr viele, weil die aufgedrückten "magnetischen Verunreinigungen" von den Alu-Körnern beim Waschen nicht vollständig entfernt werden können.) Die nicht ferromagnetische Fraktion wurde gleich dem NE-Metall zugeordnet. Aus dem schwach ferro-magnetischen Rest wurden noch VA-Stahl-Teilchen ausgelesen. Im Zweifel wurde diese Fraktion einer Dichtentrennung unterzogen, um das (wegen Verunreinigungen schwach ferro-magnetische) Alu-Metall eindeutig der NE-Metallfraktion zuordnen zu können. Schwach ferromagnetische, schwere Teilchen wurden nach Farbe entweder dem VA-Stahl oder der NE-Fraktion zugeordnet.

#### **Bestimmung des metallischen Aluminiums im "Bachema-Rückstand"**

Die Bestimmung erfolgt mit der Wasserstoff-Methode, wie beschrieben im Methodenband des ZAR (ZAR, 2014) mit dem Unterschied, dass (1) das Probenmaterial nach dem Einbringen ins Reaktionsgefäß sofort mit Wasser aufgeschlämmt wurde (zum einfacheren Durchmischen bei Reaktionsstart) und dass in der Auswertung der Sättigungsdampfdruck des Wassers (für die jeweilige Temperatur) vom Luftdruck abgezogen wurde.

#### **3.4.2 BAFU-Analyse mit Nachsortierung der Metalle und Rückstandsanalyse**

Die BAFU-Methode ist im Methodenband des BAFU (BAFU, Hrsg. 2017) als Methode F-23 beschrieben, die Proben wurden von der Bachema AG analysiert. Konventionsgemäß werden die Metalle 2-16 mm in der Probenfraktion <16 mm bestimmt und auch auf die Masse der Probenfraktion <16 mm bezogen. Die Bachema AG bestimmt standardmäßig nicht nur die Metalle 2-16 mm, sondern auch die Metalle 1-2 mm. Insofern liegen zu den Analysen mit der Bachema-Methode vergleichbare Ergebnisse für die Metalle 1-16 mm und auch das metallische Aluminium in den Rückständen <1 mm vor.

Die Nachsortierung der originalen Metallfraktionen von der BAFU-Analyse und die Bestimmung des metallischen Aluminiums im Probenrückstand <1 mm wurde analog zur Vorgangsweise bei der Bachema-Methode durchgeführt (siehe den entsprechenden Beschrieb unter 3.4.1).

#### **3.4.3 ZAR-Analyse samt Rückstandsanalysen und Reinheitsbestimmung der NE-Metallfraktionen**

Diese Analysenmethode wurde von der Stiftung Zentrum für nachhaltige Abfall- und Ressourcennutzung (ZAR) entwickelt und die Technikmaschinen dafür gebaut. Die ZAR-Analyse stellt die großtechnische NE-Metallabscheidung mit Wirbelstromabscheidern nach und maximiert diese. Das Ergebnis der ZAR-Analyse beschreibt damit den Anteil NE-Metalle einer Probe, der mit der Wirbelstromabscheidertechnik im aktuellen Zustand der Probe maximal abgetrennt werden kann.

#### **Grundkonzept der Analyse**

Die ZAR-Analyse folgt der Verfahrenstechnik der großtechnischen NE-Metallabscheidung. Das Probenmaterial wird klassiert, störende magnetische Komponenten werden vorab am Trommelmagneten abgetrennt. Die dabei erhaltenen Fraktionen an Staub und magnetischer Schlacke bilden einen Teil der "ZAR-Analysenrückstände". Aus den so vorbereiteten Proben werden die NE-Metalle abgetrennt und gereinigt, beides mit Wirbelstromtechnik. Die entmetallisierten, "aufbereiteten" Schlackenproben, die zurückbleiben, bilden einen weiteren Teil der ZAR-Analysenrückstände.

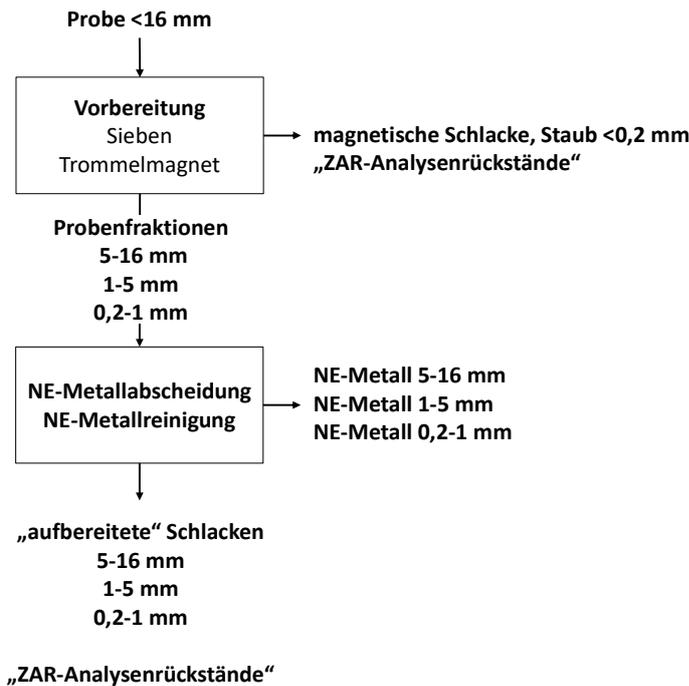


Abb. 9: Grundkonzept der ZAR-Analysenmethode.

Die NE-Metalle 5-16 mm, 1-5 mm und 0,2-1 mm stellen die maximal mit der Wirbelstromabscheidetechnik abtrennbaren NE-Metalle dar, bezogen auf den aktuellen Zustand der jeweiligen Probe (bei gegebenem Zerkleinerungszustand bzw. mechanischem Aufschlussgrad). Durch Analysen der Rückstände mit anderen Methoden kann das verbliebene NE-Metall bestimmt und ein angenäherter NE-Metallgesamtgehalt als Summe aller gefundenen NE-Metalle berechnet werden.

### Vorbereitung der Proben

Die Proben wurden über ein Cucollini-Schwingsieb vorklassiert auf >16 mm, 5-16 mm, 1-5 mm und <0,2 mm. (Anmerkung: die Fraktionen >16 mm von den Proben Restschlacke Gebr. Lienhard AG und DHZ AG wurden "konventionell" auf NE-Metalle untersucht, siehe 3.1.3.) Aus den Fraktionen 1-5 mm und 0,2-1 mm wurden mit dem Trommelmagnetabscheider ferromagnetische Komponenten abgetrennt. Diese stören die Wirbelstromabscheidung der NE-Metalle, weil sie das Wechsel-Magnetfeld am Abscheider schwächen. Bei der Körnung 5-16 mm entfiel die Magnetabscheidung. Die Abscheidung der groben NE-Metalle ist relativ unempfindlich, sodass die ferro-magnetischen Bestandteile kaum stören. Außerdem kann das grobe Material so "dünn" über den Wirbelstromabscheider gefahren werden, dass die Wechselwirkungen zwischen den verschiedenen Körnern sehr klein sind.

### Abscheidung und Reinigung der NE-Metalle

Für die Abscheidung der NE-Metalle aus dem Probenmaterial verwendet ZAR eine Technikumsanlage, die einen Wirbelstromabscheider im Industriemaßstab als Separationsaggregat nutzt. Die Technikumsanlage verfügt über eine Fördereinrichtung, mit der der Schlackenprobenrest nach dem Durchlaufen des NE-Metallabscheiders wieder in den Vorlagenbehälter zurückgeführt werden kann. Die Anlagenteile der Technikumsanlage sind so gesteuert, dass automatisiert eine vorgegebene Zahl an Durchläufen des Probenmaterials über den Wirbelstromabscheider ausgeführt werden kann ("Zyklen").

Die Analysenmaschine erzeugt NE-Metallfraktionen, die auch mineralische Körner enthalten. Die rohen NE-Metallfraktionen werden daher händisch am "Induktionsseparator" nachgereinigt. Der

Induktionsseparator ist ein "nackter" Wirbelstromabscheider, auf dem mittels einer Plexiglas-Box das NE-Metallkonzentrat ins Wechsellmagnetfeld des rotierenden Polrades gebracht werden kann. Das Material wird dünn in der Box aufgestreut. Die NE-Metallkörner lassen sich durch gezieltes Führen der Plexiglas-Box über den Abscheider von links nach rechts bewegen, während die Mineralstoffkörner liegenbleiben. Auf diese Weise können die Mineralstoffkörner quantitativ aus den rohen NE-Metallfraktionen abgetrennt werden.

### **Rückstandsanalysen**

Die "magnetischen Schlacken" und "aufbereiteten Schlacken" enthalten noch NE-Metalle, die nach einem mechanischen Aufschluss abgetrennt werden können. Idealerweise würden die ZAR-Analysenrückstände gebrochen und in eine zweite ZAR-Analyse zurückgeführt werden. Um den Aufwand einzugrenzen, wurden die ZAR-Analysenrückstände der Körnungen >1 mm bei Bachema AG mit der Bachema-Methode analysiert samt Nachsortierung der Metalle durch IBS. Im Bachema-Analysenrückstand wurde schließlich das metallische Aluminium gemessen. (Zur Durchführung von Bachema-Analysen samt Nachsortierung und Rückstandsanalyse siehe 3.4.1.) Es wurden jeweils alle Rückstände >1 mm einer ZAR-Analysenprobe (z.B. magnetische Schlacke 1-5 mm, aufbereitete Schlacken 1-5 mm und 5-16 mm) im richtigen Verhältnis gemischt und als eine Probe bei Bachema zur Analyse gegeben.

Alle Analysenrückstände <1 mm von ZAR- und Bachema-Analysen einer ZAR-Analysenprobe wurden mit der Wasserstoff-Methode gemessen, um die Gehalte an metallischem Aluminium zu bestimmen.

### **Reinheitsbestimmung der abgeschiedenen NE-Metalle**

Bei der ZAR-Methode werden alle Körner als "NE-Metall" erfasst, die mit der Wirbelstromabscheidetechnik im jeweiligen Zustand der Probe maximal abtrennbar sind. Das sind nicht nur Körner aus reinem NE-Metall, sondern auch verunreinigte NE-Metallkörner und Verbunde aus NE-Metallen und Schlacke. Je nachdem, wie hoch der Anteil an NE-Metall in einem Korn ist und wie das Metall darin verteilt ist, wird auch ein NE-Metall-Schlacke-Verbundkorn abgeschieden. In rohen Schlacken sind sehr viele reine NE-Metallkörner enthalten, daher ist der Anteil verschmutzter Körner und Verbundkörner in den abgeschiedenen NE-Metallfraktionen bei der ZAR-Analyse klein und der Analysenfehler durch die Verschmutzung gering. Die Restmetalle der aufbereiteten Schlacken setzen sich aber hauptsächlich aus schlechter abscheidbaren Körnern zusammen, darunter verschmutzte Körner und Verbunde. Um die Relevanz der Schlackenanteile in den NE-Metallfraktionen der ZAR-Analyse zu prüfen, wurden bei allen drei Restschlacken die NE-Metallfraktionen auf ihre Reinheit untersucht.

### **Anmerkung zur Art und Weise der Reinheitsbestimmung und ihren Grenzen:**

*Eine "absolute" Bestimmung der Reinheit ist nicht möglich. Die Bestimmung erfolgt der Art, dass die Körner durch Schlagbeanspruchung bestmöglich von den spröden Schlackenanteilen befreit werden. Diese Behandlung kann den Schlackenanteil nicht restlos beseitigen, weil besonders Aluminium-Schlacke-Verbunde oft über das ganze Korn dreidimensional verzahnt sind oder aus tief gefurchten Metallkörnern und von sehr rauen Oberflächen nicht alle Schlacke entfernt werden kann. Das Aluminium in Körnern mit hohem Schlackenanteil ist meist filigran geformt und bricht leicht bei der Behandlung. Zum Teil besteht der Metallanteil eines Kornes aus mehreren Metallstücken, das heißt, es entstehen bei der Behandlung Metallteilchen, die wesentlich kleiner sind als die ursprünglichen Verbund-Körner. Sehr spröde Metalle könnten bei der Behandlung zerkleinert werden, gleich wie die Schlackenanteile. Um das Metall möglichst schonend zu reinigen, erfolgt die Behandlung stufenweise, wobei saubere Körner ausgeklaut (grobe Körner) oder ausgesiebt werden. Übrig bleiben bei der Behandlung 'saubere' Metalle in verschiedenen Körnungen und der überwiegend mineralische Rest in*

*einer Körnung <0,2 mm. In diesem feinen Rest kann mit der Wasserstoff-Methode das metallische Aluminium bestimmt werden, das als "Schlupf" in die Restfraktion <0,2 mm gelangt ist.*

Ausgeführt wurde die Bestimmung folgendermaßen: Die NE-Metallfraktionen aus den Nassschlackenproben wurden zuerst mit verdünntem, handelsüblichem Kaffeemaschinen-Entkalker gereinigt, um die weiß-grauen Beläge aus erhärtetem Feinanteil zu entfernen. (Anmerkung: Ein Teil der Beläge besteht aus Carbonaten, die sich unter Aufbrausen schnell lösen. Schlackenkörner und manche Buntmetallkörner werden rascher sauber als Aluminium-Körner. Die Aluminium-Körner sind von einem weißen, hartnäckigen Belag umhüllt. Relevante Aluminium-Metall-Verluste sind beim Reinigen mit Entkalker nicht zu befürchten. An den Aluminium-Körnern entstehen im verdünnten Entkalker nur leichte Schleier feinsten Wasserstoffbläschen.) Nach dem Behandeln mit Entkalker wurden die Metall-Fraktionen gründlich mit Wasser gespült. Zum raschen Trocknen wurde nachträglich noch mit Aceton gespült. (Fotos der Fraktionen roh und nach den diversen Behandlungsstufen finden sich unter 4.4.3.) Bei den groben Fraktionen 5-16 mm wurden zuerst die sauberen Metallkörner aussortiert. Es wurden einige VA-Stahl-Teilchen gefunden, die separiert wurden. Danach wurden die Körner händisch mit Stahlstäben (mit der Stirnseite) vorsichtig auf einer Stahlunterlage geklopft. Für die groben Metalle >4 mm wurden Quadratstäbe 20 x 20 x 1000 mm benutzt. Nach dem Klopfen wurde der entstandene Feinanteil <4 mm abgesiebt und die bereits sauberen Körner >4 mm aussortiert. Klopfen und Sortieren wurde so lange wiederholt, bis alles Material sauber bzw. zerkleinert <4 mm vorlag. Die entstandene Fraktion <4 mm wurde bei 2 mm abgesiebt und der Anteil 2-4 mm wieder geklopft. Für dieses feinere Metall wurden ebenfalls Stäbe von 1 m Länge, aber 6 x 6 mm im Querschnitt verwendet. Nach dem Klopfen wurde der Feinanteil <2 mm abgesiebt und das Überkorn 2-4 mm erneut geklopft. Klopfen und Sieben wurde so lange wiederholt, bis auch die Körnung 2-4 mm als saubere Metallfraktion vorlag. Mit dem Rest <2 mm wurde mit einem 1 mm Sieb genauso verfahren, danach mit einem 0,5 mm Sieb und schließlich mit einem 0,2 mm Sieb. Auf der feinsten Bearbeitungsstufe 0,2-0,5 mm wurde aber nicht geklopft, sondern das auf der Stahlunterlage fein aufgestreute Material mit einer 70 mm Stahlkugel ohne zusätzlichen Druck überrollt. Sämtliche Metallfraktionen und der Rest <0,2 mm wurden gewogen. Die ZAR-Analyse-NE-Metalle 1-5 mm und 0,2-1 mm wurden genauso behandelt. Hier wurden allerdings keine sauberen Körner ausgeklaut, sondern jeweils die gesamte zur Bestimmung eingewogene Menge gleich geklopft und gesiebt. (Anmerkung: Es wurden jeweils Aliquote der NE-Metall-Fraktionen behandelt, das heißt, ein Teil der originalen, unbehandelten Metalle ab ZAR-Analyse ist noch vorhanden.)

### **3.5 Kontrolle der Ausführung der Restschlackenuntersuchung**

Während der gesamten Untersuchung hatten alle Beteiligten die Möglichkeit, die Probenahmen und Arbeiten zur Probenteilung jederzeit - auch unangemeldet - mitzuverfolgen. Alle Gebinde mit Probenmaterial wurden jeweils direkt nach dem Befüllen mit Siegetiketten versehen. Auch während der ZAR-Analysen in Hinwil hatten alle Beteiligten die Möglichkeit, die Arbeiten jederzeit mitzuverfolgen. Von allen Proben standen Aliquote zur Verfügung, die den Beteiligten auf Wunsch ausgehändigt wurden, um im eigenen Auftrag Analysen durchführen lassen zu können.

DHZ AG und ZAV Recycling AG stellten für den Zeitraum der Probenahmen jeweils Aufzeichnungen von den Daten der Prozessleitsysteme zur Verfügung, die dokumentieren, dass die Geschwindigkeiten der Förderbänder (Vereinzelungsbänder) an den Wirbelstromabscheidern zu den Zeiten der Probenahmen gegenüber dem Regelbetrieb unverändert waren. Für die Probenahmen bei der Aufbereitung der Gebr. Lienhard AG kann IBS bestätigen, dass an den Maschinen während der Laufzeit keine kurzfristigen Änderungen durch das Anlagenpersonal vorgenommen wurden.



## 4 Ergebnisse

Im Folgenden (Abschnitt 4.1 bis 4.3) sind die Ergebnisse aller Messungen im Detail in tabellarischer Form angegeben. In 4.4 werden die Messmethoden verglichen, speziell einzelne Aspekte wie die Mengen abgeschiedener Metalle, die Miterfassung von VA-Stahl und die Reinheiten der gewogenen NE-Metallfraktionen. Unter 4.5 werden die drei Restschlacken untereinander verglichen.

### 4.1 Restschlacke Aufbereitung Gebrüder Lienhard AG, Deponie Riet, Winterthur

#### Analysen nach BAFU- und Bachema-Methode mit Nachsortierung und Rückstandsanalyse

In der Tab. 6 sind die Ergebnisse der Analyse nach BAFU-Methode und Bachema-Methode zusammengefasst und ergänzt um die Ergebnisse der Nachsortierungen an den originalen Metallfraktionen aus den Analysen. Die originalen Werte für das NE-Metall samt VA-Stahl sind als "NE"-Metall bezeichnet.

Tab. 6: Analysenergebnisse für die Restschlacke der Aufbereitung Gebr. Lienhard AG vom Okt. 2022, Deponie Riet. Analysen nach BAFU-Methode und Bachema-Methode mit Nachsortierung und Rückstandsanalyse.

	BAFU-Methode		Bachema-Methode	
	Originalwert	Nachsortierung	Originalwert	Nachsortierung
	[% in TS <16 mm]	[% in TS <16 mm]	[% TS]	[% TS]
Fe >16 mm	---	---	0,15	0,15
"NE" bzw. NE >16 mm	---	---	0,08	0,001
VA >16 mm	---	---		0,07
Fe 8-16 mm	0,04	0,03	0,13	0,13
"NE" bzw. NE 8-16 mm	0,09	0,01	0,21	0,07
VA 8-16 mm		0,08		0,14
Fe 2-8 mm	0,36	0,31	0,44	0,41
"NE" bzw. NE 2-8 mm	0,22	0,19	0,25	0,23
VA 2-8 mm		0,06		0,04
<b>Fe 2-16 mm</b>	<b>0,40</b>	<b>0,34</b>	<b>0,57</b>	<b>0,53</b>
<b>"NE" bzw. NE 2-16 mm</b>	<b>0,31</b>	<b>0,20</b>	<b>0,46</b>	<b>0,29</b>
<b>VA 2-16 mm</b>		<b>0,14</b>		<b>0,18</b>
Fe 1-2 mm	0,06	0,04	0,06	0,06
"NE" bzw. NE 1-2 mm	0,16	0,11	0,11	0,09
VA 1-2 mm		0,01		0,01
<b>Fe 1-16 mm</b>	<b>0,45</b>	<b>0,39</b>	<b>0,63</b>	<b>0,59</b>
<b>"NE" bzw. NE 1-16 mm</b>	<b>0,47</b>	<b>0,31</b>	<b>0,57</b>	<b>0,39</b>
<b>VA 1-16 mm</b>		<b>0,15</b>		<b>0,19</b>
<b>Fe &gt;1 mm</b>	---	---	<b>0,79</b>	<b>0,74</b>
<b>"NE" bzw. NE &gt;1 mm</b>	---	---	<b>0,66</b>	<b>0,39</b>
<b>VA &gt;1 mm</b>		---		<b>0,26</b>
Al met <1 mm (im Analysenrückstand <1 mm)		0,29		0,27
<b>NE "Gesamtgehalt" *</b>		<b>0,60</b>		<b>0,66</b>

\* auf die tatsächlichen Gesamtgehalte fehlen die schweren NE-Metalle <1 mm

Es ist zu erkennen, dass besonders in den gröberen Körnungen die Werte von "NE"-Metall durch die Nachsortierung zu reinem NE-Metall stark sinken. Das heißt, dass ein erheblicher Anteil VA-Stahl in den originalen "NE"-Metallen der praxisüblichen Restmetallanalysen vorliegt. Das reine NE-Metall >1 mm aus der Nachsortierung macht bei der Analyse nach Bachema-Methode z.B. nur noch 59 % des originalen "NE"-Metall-Wertes aus. Bei der Analyse nach BAFU-Methode für das Metall 2-16 mm ist das Verhältnis bei der Nachsortierung ähnlich, hier bleiben 64 % als reines NE-Metall vom originalen "NE".

Bei der BAFU-Analyse sind die Ergebnisse konventionsgemäß auf die Masse der Probenfraktion <16 mm bezogen. Der Massenanteil des nicht in der Analyse berücksichtigten Überkorns >16 mm belief sich bei der Restschlacke von der Aufbereitung Gebr. Lienhard AG auf ca. 22 % der Proben-TS. Trotz der geringeren Bezugsmasse liefert die BAFU-Methode hier kleinere Analysenwerte. Das heißt, dass in der Probenfraktion >16 mm gegenüber der Probenfraktion <16 mm überproportional (eingeschlossene) Metalle vorhanden sein müssen.

Bachema AG schließt bei der BAFU-Methode standardmäßig die Metall-Bestimmung in der Korngrößenklasse 1-2 mm an. (Anmerkung: das zum Zweck, Analysenproben für chemische Parameter aufbereiten zu können). Aus diesem Grund liegen sowohl für Bachema- als auch BAFU-Analyse Probenrückstände <1 mm vor, die an Metallen abgereichert sind. Diese Rückstände wurden noch mit der Wasserstoff-Methode auf metallisches Aluminium gemessen. Unten in der Tab. 6 sind diese Werte angegeben. Wenn alle Werte von Tab. 6 je Analysenvariante über die Korngrößen aufsummiert werden und noch das metallische Aluminium dazugezählt wird, ergibt sich eine Näherung für den NE-Metall-Gesamtgehalt. In dieser Näherung fehlt nur das schwere NE-Metall <1 mm, das im Probenrückstand <1 mm nach der Bachema- bzw. BAFU-Analyse noch vorhanden ist.

#### **Analyse nach ZAR-Methode mit Rückstandsanalysen**

NE-Metalle >16 mm wurden in der Restschlackenprobe nur vereinzelt gefunden zu einem Massenanteil von nur 0,01 % TS (siehe ca. Mitte in Tab. 7). Mit der ZAR-Analyse selbst konnten insgesamt 0,33 % TS NE-Metalle aus der Probe abgetrennt werden, wobei nur ein sehr kleiner Teil auf den Körnungsbereich 0,2-1 mm entfiel (0,03 % TS). Diese mit der ZAR-Analyse bestimmten NE-Metalle sind potentiell mit Wirbelstromabscheidern aus der Restschlacke abscheidbar, ohne dass die Schlacke dazu gebrochen werden müsste. Die NE-Metallfraktionen der ZAR-Analyse enthalten allerdings viele verschmutzte NE-Metallkörner und NE-Metall-Schlacke-Verbunde. Wenn die Ergebnisse aus der Reinheitsbestimmung (siehe dazu 4.4.3) berücksichtigt werden, ergeben sich auf Basis der reinen NE-Metalle deutlich tiefere Analysenwerte. Diese Werte sind rechts neben den Originalwerten unter "Basis reines NE-Metall" angeführt.

"Eingeschlossenes" NE-Metall 1-16 mm, das nur durch Aufbrechen der Schlacke abtrennbar ist, wurde im Ausmaß von 0,23 % TS mit der Bachema-Methode samt Nachsortierung im Zuge der "Rückstandsanalysen" gefunden. Ein erheblicher Teil der eingeschlossenen Metalle, nämlich 0,26 % TS des NE-Metallgesamtgehalts wurde im Rückstand der Bachema-Analyse als metallisches Aluminium <1 mm bestimmt. Wieviel davon erst bei der Bachema-Analyse durch Kornbruch in die Korngrößenklasse <1 mm verschoben wurde, ist unbekannt.

In den "primären" Feianteilen 0,2-1 mm wurde nur wenig NE-Metall mit der ZAR-Methode gefunden (0,01 % TS reines NE-Metall) und auch metallisches Aluminium in den Rückständen (magnetische und aufbereitete Schlacke 0,2-1 mm) nur in Spuren (unterer Abschnitt Tab. 7). Im Schlackenstaub <0,2 mm war metallisches Aluminium gar nicht nachweisbar.

Werden alle Beiträge aus den einzelnen Analysen aufsummiert, ergibt sich eine Näherung für den NE-Metallgesamtgehalt der Restschlacke Aufbereitung Gebr. Lienhard AG von 0,68 % TS. (Anmerkung:

"Gesamtgehalt" auf Basis reinen NE-Metalls; im "Gesamtgehalt" fehlt das schwere NE-Metall <1 mm, das in der Restschlacke ursprünglich als eingeschlossenes Metall vorlag) Der im aktuellen Zustand der Restschlacke potentiell abtrennbare Anteil NE-Metalle 0,2-16 mm macht vom "Gesamtgehalt" ca. 25 % aus. (vergl. Werte aus Tab. 7 für das reine NE-Metall: 0,17 % TS abtrennbares Metall 0,2-16 mm bezogen auf 0,68 % TS „Gesamtgehalt“)

Tab. 7: Analyseergebnisse für die Restschlacke Aufbereitung Gebr. Lienhard AG, Deponie Riet, Okt. 2022. Analyse nach ZAR-Methode mit Rückstandsanalysen. Werte in % Metall in TS gesamte Restschlacke.

ZAR-Analyse	Originalwert	Basis reines NE-Metall
	[% TS]	[% TS]
NE 5-16 mm	0,12	0,07
NE 1-5 mm	0,18	0,09
NE 0,2-1 mm	0,03	0,01
<b>NE 1-16 mm</b>	<b>0,30</b>	<b>0,16</b>
<i>in % von Gesamtgehalt NE 1-16 mm</i>		41 %
<b>NE 0,2-16 mm</b>	<b>0,33</b>	<b>0,17</b>
<b>Rückstandsanalysen</b>		
<b>Probenfraktion &gt;16 mm</b>		
(Analyse: Brechen und Sieben <16 mm, Sortierung der Metalle)		
NE >16 mm		0,01
<b>ZAR-Rückstand 1-16 mm + Rückstand aus Probenfraktion &gt;16 mm</b>		
(Analyse: Bachema-Methode samt Nachsortierung)		
NE 8-16 mm		0,03
NE 2-8 mm		0,14
NE 1-2 mm		0,06
<b>NE 1-16 mm</b>		<b>0,23</b>
<b>Bachema-Rückstand &lt;1 mm resultierende aus</b>		
<b>ZAR-Rückstand 1-16 mm + Rückstand aus Probenfraktion &gt;16 mm</b>		
(Analyse: Wasserstoff-Methode)		
Al met <1 mm		0,26
<b>ZAR-Rückstände &lt;1 mm</b>		
(Analyse: Wasserstoff-Methode)		
Al met aus:		
aufbereiteter Schlacke 0,2-1 mm		0,012
magnetischer Schlacke 0,2-1 mm		0,004
Schlackenstaub <0,2 mm		0
<b>Summe NE in Rückständen</b>		<b>0,51</b>
<b>"Gesamtgehalt" *</b>		<b>0,68</b>
<b>Gesamtgehalt NE 1-16 mm</b>		<b>0,39</b>
<b>Gesamtgehalt NE &gt;1 mm</b>		<b>0,40</b>

\* auf den tatsächlichen Gesamtgehalt fehlt das schwere NE-Metall, das in der ursprünglichen Probe als eingeschlossenes Metall vorlag

## 4.2 Restschlacke Aufbereitung DHZ AG, Lufingen

### Bachema- und BAFU-Analysen mit Nachsortierung und Rückstandsanalysen

Ähnlich wie bei der Restschlacke Aufbereitung Gebr. Lienhard AG befindet sich auch bei der Restschlacke DHZ AG ein erheblicher Anteil VA-Stahl in den "NE"-Metallfraktionen der originalen Analysen. Bei der Bachema-Methode bleiben ca. 60 % des ursprünglichen "NE"-Metalls >1 mm als reines NE-Metall >1 mm bei der Nachsortierung. Auch das Muster, dass die BAFU-Methode niedrigere Werte liefert als die Bachema-Methode, obwohl bei der BAFU-Methode die Bezugsmasse kleiner ist, ist bei der Restschlacke DHZ AG zu beobachten. Der Massenanteil >16 mm an der Restschlacken-TS beträgt hier ca. 7,5 %. Das heißt, auch bei der Restschlacke DHZ AG befindet sich überproportional eingeschlossenes NE-Metall in der Fraktion >16 mm.

Tab. 8: Analysergebnisse für die Restschlacke DHZ AG vom März 2023. Analysen nach BAFU-Methode und Bachema-Methode mit Nachsortierung und Rückstandsanalyse.

	BAFU-Methode		Bachema-Methode	
	Originalwert	Nachsortierung	Originalwert	Nachsortierung
	[% in TS <16 mm]	[% in TS <16 mm]	[% TS]	[% TS]
Fe >16 mm	---	---	0,002	0,002
"NE" bzw. NE >16 mm	---	---	0,23	0,05
VA >16 mm	---	---		0,18
Fe 8-16 mm	0	0,0004	0,06	0,04
"NE" bzw. NE 8-16 mm	0,07	0,02	0,13	0,03
VA 8-16 mm		0,05		0,11
Fe 2-8 mm	0,13	0,07	0,07	0,06
"NE" bzw. NE 2-8 mm	0,30	0,26	0,37	0,31
VA 2-8 mm		0,07		0,03
<b>Fe 2-16 mm</b>	<b>0,13</b>	<b>0,07</b>	<b>0,13</b>	<b>0,11</b>
<b>"NE" bzw. NE 2-16 mm</b>	<b>0,37</b>	<b>0,27</b>	<b>0,50</b>	<b>0,34</b>
<b>VA 2-16 mm</b>		<b>0,12</b>		<b>0,15</b>
Fe 1-2 mm	0,13	0,08	0,08	0,07
"NE" bzw. NE 1-2 mm	0,17	0,16	0,19	0,17
VA 1-2 mm		0,01		0,005
<b>Fe 1-16 mm</b>	<b>0,26</b>	<b>0,14</b>	<b>0,21</b>	<b>0,17</b>
<b>"NE" bzw. NE 1-16 mm</b>	<b>0,55</b>	<b>0,44</b>	<b>0,69</b>	<b>0,51</b>
<b>VA 1-16 mm</b>		<b>0,14</b>		<b>0,15</b>
<b>Fe &gt;1 mm</b>	---	---	<b>0,21</b>	<b>0,18</b>
<b>"NE" bzw. NE &gt;1 mm</b>	---	---	<b>0,92</b>	<b>0,56</b>
<b>VA &gt;1 mm</b>		---		<b>0,33</b>
Al met <1 mm (im Analysenrückstand <1 mm)		0,30		0,34
<b>NE "Gesamtgehalt" *</b>		<b>0,73</b>		<b>0,89</b>

\* auf die tatsächlichen Gesamtgehalte fehlen die schweren NE-Metalle <1 mm

### Analyse nach ZAR-Methode mit Rückstandsanalysen

Bei der ZAR-Analysen-Variante wurden nur unbedeutende Mengen NE-Metall >16 mm gefunden, ca. 0,01 % TS. Die mit der Wirbelstromabscheidetechnik abtrennbaren NE-Metalle summierten sich auf 0,58 % TS im Originalzustand der ZAR-Analyse bzw. 0,38 % TS gerechnet als reines NE-Metall. Wie bei der Restschlacke Aufbereitung Gebr. Lienhard AG entfällt nur ein sehr kleiner Teil davon auf die Körnung 0,2-1 mm (0,05 % TS original bzw. 0,01 % TS reines NE-Metall). Der Anteil mit der Wirbelstromabscheidetechnik maximal erfassbarer NE-Metalle am "NE-Metall-Gesamtgehalt" liegt berechnet auf Basis reiner NE-Metalle bei ca. 42 %.

Tab. 9: Analysenergebnisse für die Restschlacke DHZ AG vom März 2023. Analyse nach ZAR-Methode mit Rückstandsanalysen. Werte in % Metall in TS gesamte Restschlacke.

ZAR-Analyse	Originalwert	Basis reines NE-Metall
	[% TS]	[% TS]
NE 5-16 mm	0,20	0,14
NE 1-5 mm	0,33	0,22
NE 0,2--1 mm	0,05	0,01
<b>NE 1-16 mm</b>	<b>0,53</b>	<b>0,36</b>
<i>in % von Gesamtgehalt NE 1-16 mm</i>		64 %
<b>NE 0,2-16 mm</b>	<b>0,58</b>	<b>0,38</b>
<b>Rückstandsanalysen</b>		
<b>Probenfraktion &gt;16 mm</b>		
(Analyse: Brechen und Sieben <16 mm, Sortierung der Metalle)		
NE >16 mm		0,01
<b>ZAR-Rückstand 1-16 mm + Rückstand aus Probenfraktion &gt;16 mm</b>		
(Analyse: Bachema-Methode samt Nachsortierung)		
NE 8-16 mm		0,02
NE 2-8 mm		0,13
NE 1-2 mm		0,06
<b>NE 1-16 mm</b>		<b>0,20</b>
<b>Bachema-Rückstand &lt;1 mm resultierende aus</b>		
<b>ZAR-Rückstand 1-16 mm + Rückstand aus Probenfraktion &gt;16 mm</b>		
(Analyse: Wasserstoff-Methode)		
Al met <1 mm		0,31
<b>ZAR-Rückstände &lt;1 mm</b>		
(Analyse: Wasserstoff-Methode)		
Al met aus:		
aufbereiteter Schlacke 0,2-1 mm		0,004
magnetischer Schlacke 0,2-1 mm		0,001
Schlackenstaub <0,2 mm		0,001
<b>Summe NE in Rückständen</b>		<b>0,53</b>
<b>"Gesamtgehalt" *</b>		<b>0,91</b>
<b>Gesamtgehalt NE 1-16 mm</b>		<b>0,56</b>
<b>Gesamtgehalt NE &gt;1 mm</b>		<b>0,58</b>

\* auf den tatsächlichen Gesamtgehalt fehlt das schwere NE-Metall, das in der ursprünglichen Probe als eingeschlossenes Metall vorlag

Die Charakteristik der Verteilung der NE-Restmetalle ist generell aber sehr ähnlich. Auch in der Restschlacke DHZ AG findet sich ein beträchtlicher Anteil metallischen Aluminiums als eingeschlossenes Metall <1 mm in den Restschlackenfraktionen >1 mm (0,31 % TS). Gleich ist auch der Sachverhalt, dass sich in den primären Feinfraktionen, dem Staub <0,2 mm und den ZAR-Rückständen, aufbereitete und magnetische Schlacke 0,2-1 mm nur Spuren von metallischem Aluminium nachweisen lassen.

### 4.3 Restschlacke Aufbereitung ZAV Recycling AG, Hinwil

Die fünf verschiedenen Restschlackenfraktionen, die bei ZAV Recycling AG anfallen, wurden separat untersucht. Mit dem Massenverhältnis unter den Fraktionen wurde der NE-Metallgehalt der Restschlacke im Gesamten berechnet (als gewichteter Mittelwert). Im Folgenden sind zuerst das Massenverhältnis und die separaten Analysen beschrieben, unter 4.3.2.3 sind die Ergebnisse, die für die gesamte Restschlacke berechnet sind, angegeben.

#### 4.3.1 Massenanteile der einzelnen Restschlackenfraktionen

Das Verhältnis der Massen zwischen den Restschlackenfraktionen ist wie folgt (Angaben ZAV Recycling AG):

Tab. 10: Massenanteile der verschiedenen Restschlackenfraktionen bei der ZAV Recycling AG im März 2023.

Restschlackenfraktion	Massenanteil [% TS Restschlacke total]
aufbereitete Schlacke 1-15 mm	48,7
aufbereitete Schlacke 0,2-1 mm	16,3
magnetische Schlacke 0,2-15 mm	28,7
Schlackenstaub total <0,2 mm	6,4
Aufteilung Schlackenstaub *:	
Schlackenstaub, Triage <0,2 mm	5,1
Schlackenstaub, Innenaufbereitung <0,2 mm	1,3

\* wurde nicht bestimmt; Schätzung Skutan, Verhältnis 80 / 20 zwischen Staub Triage und Staub Innenaufbereitung

Die Massenflüsse vom Staub aus der Triage und der Innenaufbereitung wurden nicht separat bestimmt, sondern nur als Summe. Für die Hochrechnung der NE-Metall-Gesamtgehalte wird eine Schätzung verwendet: 80 % des Staubs wird als Triage-Staub gerechnet, 20 % als Staub von der Innenaufbereitung. Auf die Ergebnisse der Gehalte an NE-Metallen >0,2 mm hat dieses Verhältnis keinen Einfluss. Relevant ist die Schätzung nur für den NE-Metallgesamtgehalt, weil die Gehalte an metallischem Aluminium <0,2 mm in den beiden Stäuben sehr verschieden sind (ca. 0,8 % und 1,7 %; siehe Tab. 14).

### 4.3.2 Analysenergebnisse von den einzelnen Restschlackenfraktionen

#### 4.3.2.1 Aufbereitete Schlacke 1-15 mm und magnetische Schlacke 0,2-15 mm

##### Bachema- und BAFU-Analysen mit Nachsortierung und Rückstandsanalysen

Von der aufbereiteten Schlacke 1-15 mm und der magnetischen Schlacke 0,2-15 mm wurden bei Bachema jeweils zwei Analysen (an Parallelproben) durchgeführt: (1) die Analyse nach der Bachema-Methode und (2) nach der BAFU-Methode. Nachdem diese Restschlacken keinen Anteil >16 mm enthalten und Bachema AG standardmäßig bei der BAFU-Analyse auch die Metalle 1-2 mm mitbestimmt, sind diese beiden Analysen fast gleich. Der Unterschied besteht nur in der für das Schlackenprojekt modifizierten Art der Probenteilung bei der Bachema-Analyse (siehe 3.4.1).

Die Ergebnisse der jeweils parallelen Bachema- und BAFU-Analysen sind in den folgenden beiden Tabellen angegeben. Es sind die originalen Daten über das "NE"-Metall (Mischung aus reinem NE-Metall und VA-Stahl) angegeben und die Daten für das reine NE-Metall und den VA-Stahl aus der Nachsortierung. (Anmerkung: Die Summen aus NE-Metall und VA-Stahl stimmen deshalb meistens nicht mit den originalen Werten für das "NE"-Metall überein, weil (1) mineralische Verunreinigungen entfernt wurden und (2) zum Teil aus dem originalen "Fe"-Metall VA-Stahl und magnetisch verschmutzte NE-Metallplättchen noch umsortiert wurden.)

Tab. 11: Analysenergebnisse für die **aufbereitete Schlacke 1-15 mm** der ZAV Recycling AG. (Werte bezogen auf die aufbereitete Schlacke 1-15 mm, nicht auf ganze Restschlacke)

	BAFU-Methode		Bachema-Methode		Abweichung BAFU/Bachema	
	Originalwert	Nachsortierung	Originalwert	Nachsortierung	Originalw.	Nachsort.
	[% in TS <16 mm]	[% in TS <16 mm]	[% TS]	[% TS]	[rsd %]	[rsd %]
Fe 8-16 mm	0	0	0	0	---	---
"NE" bzw. NE 8-16 mm	0,04	0,01	0,12	0,02	64 %	56 %
VA 8-16 mm		0,03		0,10		69 %
Fe 2-8 mm	0	0	0	0	---	---
"NE" bzw. NE 2-8 mm	0,36	0,28	0,26	0,22	24 %	16 %
VA 2-8 mm		0,02		0,01		43 %
<b>Fe 2-16 mm</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>---</b>	<b>---</b>
<b>"NE" bzw. NE 2-16 mm</b>	<b>0,41</b>	<b>0,29</b>	<b>0,38</b>	<b>0,24</b>	<b>6 %</b>	<b>12 %</b>
<b>VA 2-16 mm</b>		<b>0,05</b>		<b>0,10</b>		<b>52 %</b>
Fe 1-2 mm	0,016	0,009	0,004	0,003	90 %	75 %
"NE" bzw. NE 1-2 mm	0,20	0,17	0,19	0,17	3 %	1 %
VA 1-2 mm		0,01		0,003		61 %
<b>Fe 1-16 mm</b>	<b>0,016</b>	<b>0,009</b>	<b>0,004</b>	<b>0,003</b>	<b>90 %</b>	<b>75 %</b>
<b>"NE" bzw. NE 1-16 mm</b>	<b>0,60</b>	<b>0,46</b>	<b>0,56</b>	<b>0,41</b>	<b>5 %</b>	<b>8 %</b>
<b>VA 1-16 mm</b>		<b>0,06</b>		<b>0,11</b>		<b>45 %</b>
Al met <1 mm (im Analysenrückstand <1 mm)		0,71		0,72		1 %
<b>NE "Gesamtgehalt" *</b>		<b>1,16</b>		<b>1,13</b>		<b>2 %</b>

\*auf den tatsächlichen Gesamtgehalt fehlen die schweren NE-Metalle <1 mm

Tab. 12: Analyseergebnisse für die **magnetische Schlacke 0,2-15 mm** der ZAV Recycling AG. (Werte bezogen auf die magnetische Schlacke 0,2-15 mm, nicht auf ganze Restschlacke)

	BAFU-Methode		Bachema-Methode		Abweichung BAFU/Bachema	
	Originalwert	Nachsortierung	Originalwert	Nachsortierung	Originalw.	Nachsort.
	[% in TS <16 mm]	[% in TS <16 mm]	[% TS]	[% TS]	[rsd %]	[rsd %]
Fe 8-16 mm	0,49	0,44	0,55	0,42	---	---
"NE" bzw. NE 8-16 mm	0,11	0,03	0,16	0,05	28 %	28 %
VA 8-16 mm		0,12		0,24		47 %
Fe 2-8 mm	2,29	1,88	1,76	1,64	---	---
"NE" bzw. NE 2-8 mm	0,24	0,41	0,44	0,41	41 %	1 %
VA 2-8 mm		0,19		0,11		40 %
<b>Fe 2-16 mm</b>	2,78	2,32	2,31	2,06	---	---
<b>"NE" bzw. NE 2-16 mm</b>	0,35	0,44	0,60	0,46	<b>37 %</b>	<b>3 %</b>
<b>VA 2-16 mm</b>		0,31		0,35		<b>8 %</b>
Fe 1-2 mm	0,56	0,44	0,51	0,49	6 %	7 %
"NE" bzw. NE 1-2 mm	0,15	0,21	0,22	0,22	26 %	2 %
VA 1-2 mm		0,01		0,01		11 %
<b>Fe 1-16 mm</b>	<b>3,33</b>	<b>2,76</b>	<b>2,82</b>	<b>2,55</b>	<b>12 %</b>	<b>6 %</b>
<b>"NE" bzw. NE 1-16 mm</b>	<b>0,50</b>	<b>0,65</b>	<b>0,82</b>	<b>0,67</b>	<b>34 %</b>	<b>3 %</b>
<b>VA 1-16 mm</b>		<b>0,33</b>		<b>0,37</b>		<b>8 %</b>
Al met <1 mm (im Analysenrückstand <1 mm)		1,01		1,02		1 %
<b>NE "Gesamtgehalt" *</b>		<b>1,65</b>		<b>1,69</b>		<b>2 %</b>

\*auf den tatsächlichen Gesamtgehalt fehlen die schweren NE-Metalle <1 mm

Die Übereinstimmung zwischen Bachema- und BAFU-Variante ist je nach Parameter verschieden gut. In Tab. 11 und Tab. 12 sind jeweils rechts die Abweichungen unter den Ergebnissen von Bachema- und BAFU-Analyse als Streuungen (rsd in %) angegeben. Bei der magnetischen Schlacke 0,2-15 mm führt die Nachsortierung zu einer gravierenden Verbesserung der Übereinstimmung für das NE-Metall 1-16 mm. Bei der aufbereiteten Schlacke 1-15 mm ist die Übereinstimmung für das "NE"- oder NE-Metall insgesamt gut. Bemerkenswert sind die kleinen Streuungen für die "Gesamtgehalte" mit jeweils rsd-Werten um 2 %.

### ZAR-Analyse mit Rückstandsanalysen

Üblicherweise wird bei der ZAR-Analyse zumindest in den Körnungen 0,2-1 mm und 1-5 mm magnetische Schlacke abgeschieden (Teil der ZAR-Analysenrückstände). Die Analyse der Restschlackenfraktionen von ZAV Recycling AG bildet hier eine Ausnahme, weil die Magnetabscheidung in dieser Art am Trommelmagneten bereits in der Schlackenaufbereitung erfolgt. Bei der ZAR-Analyse werden daher nur die "aufbereiteten" Schlacken der ZAV Recycling AG direkt mit der Wirbelstromtechnik untersucht. Die magnetische Schlacke 0,2-15 mm der ZAV Recycling AG ist in dem Fall einem ZAR-Analysenrückstand gleichzusetzen. Nachdem aber die magnetische Schlacke ab ZAV Recycling AG in Körnung 0,2-15 mm vorliegt und auch in der Analyse der magnetischen Schlacke kein Siebschnitt bei 1 mm durchgeführt wurde, können die Ergebnisse für die Körnung 1-15 mm aus aufbereiteter Schlacke (ZAR-Analyse) und magnetischer Schlacke (ZAR-Rückstandsanalyse) nicht zusammengeführt werden. Die Zusammenführung von ZAR-Analyse mit den gesamten "Rückstandsanalysen" ist hier nur für die gesamte Restschlacke (Punkt 4.3.2.3) möglich, nicht aber separat für der Körnung 1-16 mm.

In Tab. 13 sind die Ergebnisse von allen Analysenstufen an der aufbereiteten Schlacke 1-15 mm zusammengefasst. Die ZAR-Analyse ergab insgesamt 0,80 % TS mit der Wirbelstromabscheidetechnik abtrennbares NE-Metall. Nach Abzug der Verunreinigungen sind es 0,66 % TS, gerechnet als reines

NE-Metall (siehe Reinheitsbestimmung NE-Metallfraktionen unter 4.4.3). In den Rückständen der ZAR-Analyse wurden insgesamt noch 0,58 % TS NE-Metall gefunden, wobei davon 0,17 % TS bei der Bachema-Analyse abgetrennt wurden und der Rest (0,41 % TS) als metallisches Aluminium <1 mm im Bachema-Rückstand vorlag. (Alle Werte hier stehen für die Gehalte in der aufbereiteten Schlacke 1-15 mm, nicht in der gesamten Restschlacke.)

Tab. 13: Analysenergebnisse für die aufbereitete Schlacke 1-15 mm der ZAV Recycling AG in der ZAR-Analyse samt Rückstandsanalysen. (Werte in % NE-Metall in aufbereiteter Schlacke 1-15 mm)

ZAR-Analyse	Originalwert	Basis reines NE-Metall
	[% TS]	[% TS]
NE 5-16 mm	0,17	0,12
NE 1-5 mm	0,63	0,54
<b>NE 1-16 mm</b>	<b>0,80</b>	<b>0,66</b>
<i>in % von Gesamtgehalt NE 1-16 mm</i>		<i>80 %</i>
<b>Rückstandsanalysen</b>		
<b>ZAR-Rückstand 1-16 mm</b>		
(Analyse: Bachema-Methode samt Nachsortierung)		
NE 8-16 mm		0,002
NE 2-8 mm		0,09
NE 1-2 mm		0,07
NE 1-16 mm		0,17
<b>Bachema-Rückstand &lt;1 mm</b>		
(Analyse: Wasserstoff-Methode)		
Al met <1 mm		0,41
<b>Summe NE in Rückständen</b>		<b>0,58</b>
<b>"Gesamtgehalt" *</b>		<b>1,24</b>
<b>Gesamtgehalt NE 1-16 mm</b>		<b>0,83</b>

\* auf den tatsächlichen Gesamtgehalt fehlt das schwere NE-Metall 0,2-1 mm, das in der ursprünglichen Probe als eingeschlossenes Metall vorlag

#### 4.3.2.2 Aufbereitete Schlacke 0,2-1 mm und Schlackenstäube <0,2 mm

In der aufbereiteten Schlacke 0,2-1 mm wurden die NE-Metalle mit der ZAR-Methode gemessen. Magnetische Schlacke 0,2-1 mm als ZAR-Rückstand fiel hier nicht an, weil die Magnetabscheidung bereits in der Anlage der ZAV Recycling AG stattfindet und dieses Material in der magnetischen Schlacke 0,2-15 mm enthalten ist. Im ZAR-Rest der aufbereiteten Schlacke 0,2-1 mm wurde noch mit der Wasserstoff-Methode das metallische Aluminium gemessen. Für den NE-Metallgesamtgehalt fehlt das NE-schwer-Metall <0,2 mm und das bei der ZAR-Analyse möglicherweise nicht vollständig erfasste NE-schwer-Metall 0,2-1 mm. In den Stäuben wurde nur das metallische Aluminium mit der Wasserstoff-Methode bestimmt. Die Ergebnisse sind wie folgt:

Tab. 14: Analysenergebnisse für die aufbereitete Schlacke 0,2-1 mm und die beiden Stäube <0,2 mm der ZAV Recycling AG. (Werte jeweils in % TS der jeweiligen Restschlackenfraktion)

	aufbereitete Schlacke 0,2-1 mm		Schlackenstaub Triage <0,2 mm	Schlackenstaub Innenaufb. <0,2 mm
	Originalwert	Basis reines NE-Metall		
	[% TS]	[% TS]	[% TS]	[% TS]
<b>ZAR-Analyse</b>				
NE 0,2-1 mm	1,01	0,87	---	---
<b>Rückstandsanalyse</b>				
Al met <1 mm (über Wasserstoff-Methode)		0,89	0,79	1,70
<b>"Gesamtgehalt"</b>		1,76	0,79	1,70

Die Reinheitsbestimmung für das NE-Metall 0,2-1 mm aus der ZAR-Analyse ergab einen vergleichsweise niedrigen Anteil an Verunreinigungen (zur Reinheitsbestimmung siehe 4.4.3.3). Der ZAR-Analysenwert ändert sich beim Übergang von Original zur Basis reinen NE-Metalls nur moderat.

#### 4.3.2.3 Hochrechnung der Ergebnisse auf die gesamte Restschlacke

Für die Hochrechnung wurden die Analysenergebnisse je Restschlackenfraktion jeweils mit dem Massenanteil der Restschlackenfraktion an der gesamten Restschlacke (Tab. 10) gewichtet. Diese gewichteten Werte sind in Tab. 15 zusammengestellt und aufsummiert.

Tab. 15: Hochrechnung der NE-Metallgehalte der Restschlacke der ZAV Recycling AG im Gesamten. (alle Werte in % TS für die Restschlacke total)

	aufb. S. 1-15 mm		aufb. S. 0,2-1 mm		magn. S. 0,2-15 mm	Staub Triage	Staub Innenaufb.	Restschlacke total
Massenanteil Schlackenfr. an Restschlacke total [%]	48,7		16,3		28,7	5,1	1,3	100,0
	ZAR		ZAR-Rück.					
	[% TS]	[% TS]	[% TS]	[% TS]	[% TS]	[% TS]	[% TS]	[% TS]
<b>ZAR-Analyse, Originalwerte</b>								
NE 5-16 mm, ZAR	0,08							
NE 1-5 mm, ZAR	0,31							
NE 0,2-1 mm, ZAR			0,16					
<b>ZAR-Analyse, Basis reines NE-Metall</b>								
NE 5-16 mm, ZAR	0,06							0,06
NE 1-5 mm, ZAR	0,26							0,26
NE 0,2-1 mm, ZAR			0,14					0,14
NE 8-16 mm, Bach. + Nachs.		0,001			0,01			0,01
NE 2-8 mm, Bach. + Nachs.		0,05			0,12			0,16
NE 1-2 mm, Bach. + Nachs.		0,03			0,06			0,10
Al met <1 mm, Wasserst.-M.		0,20		0,15	0,29	0,04	0,02	0,70
<b>Summe ("Gesamtgehalt")*</b>	<b>0,32</b>	<b>0,28</b>	<b>0,14</b>	<b>0,15</b>	<b>0,48</b>	<b>0,04</b>	<b>0,02</b>	<b>1,43</b>
<i>Anteil an Summe [%]</i>	22	20	10	10	34	3	2	100
<b>nur ZAR-Analyse</b>								
<b>Basis reines NE-Metall</b>	<b>0,32</b>		<b>0,16</b>					<b>0,49</b>
<i>Anteil an "Gesamtgehalt" [%]</i>	22		10					34

\* "Gesamtgehalt" berechnet mit ZAR-Analysenwerten auf Basis reiner NE-Metalle; auf den echten Gesamtgehalt fehlen NE-schwer-Metalle <0,2 mm und NE-schwer-Metalle 0,2-1 mm, die ursprünglich als eingeschlossenes Metall vorgelegen sind

Als "Gesamtgehalt" ergibt sich ein Massenanteil von 1,43 % TS NE-Metall (berechnet auf Basis reiner NE-Metalle), davon sind 0,49 % TS potentiell mit der Wirbelstromabscheidetechnik abtrennbar.

#### 4.4 Methodenvergleich BAFU-, Bachema- und ZAR-Methode zur NE-Metallbestimmung in den Restschlacken

Alle drei Messverfahren für die NE-Metallgehalte funktionieren nach dem Prinzip, dass die NE-Metalle aus den Proben separiert und dann gewogen werden. Unterschiede bestehen dahingehend, dass zur Separation der NE-Metalle bei der ZAR-Methode die Wirbelstromabscheidetechnik anstatt der klassischen Technik des selektiven Zerkleinerns der Mineralik mit Aussieben und Sortieren der Metalle (BAFU- und Bachema-Methode) verwendet wird. Bei der BAFU-Methode wird im Gegensatz zu den beiden anderen Methoden nur die Probenfraktion 0-16 mm analysiert. Zwei prinzipielle Möglichkeiten bestehen, dass sich die Messgrößen bei den verschiedenen Messmethoden unterscheiden können:

- (1) der Umfang der abgeschiedenen Metalle, das heißt, die Vollständigkeit der Separation bzw. eventuell umgekehrt das systematische Miterfassen anderer Metalle (z.B. VA-Stahl) und
- (2) die Reinheit der gewogenen Metallfraktionen.

In der folgenden Tabelle sind die wichtigsten Merkmale der Bachema- und ZAR-Methode hinsichtlich der Aussage der Messergebnisse und auch der möglichen Störungen zusammengestellt. Für die BAFU-Methode gelten dieselben Angaben wie für die Bachema-Methode mit dem Unterschied, dass die BAFU-Methode nur die Korngrößenklasse 0-16 mm einer (Rest-) Schlacke charakterisiert.

Tab. 16: Gegenüberstellung der Arbeitsweisen von Bachema- und ZAR-Analyse und der möglichen Störungen bei der Bestimmung.

	<b>Bachema-Methode</b>	<b>ZAR-Methode</b>
<b>Arbeitsweise zur Separation der NE-Metalle aus den Proben</b>	Selektive Zerkleinerung der Mineralstoffkörner und Aussieben der Metalle gefolgt von Magnetsortierung	Abtrennen und Aufreinigen der NE-Metalle mit Wirbelstromtechnik nach Konditionierung der Proben (Siebklassierung, z.T. Abtrennung "magnetischer Schlacke")
<b>Aussage des Parameters</b>	Gesamtgehalt Summe NE-Metalle und VA-Stahl >1 mm	Gehalt an mit der Wirbelstromtechnik maximal abtrennbaren Körnern
<b>Unschärfen und Störungen (Abhilfen)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>–VA-Stahl wird als NE-Metall erfasst (Nachsortierung)</li> <li>–Kornbruch von NE-Metallen (schonendere selektive Zerkleinerung)</li> <li>–Verunreinigung der NE-Metalle durch Restmineralik (Kompromiss zu finden zwischen Anteil Restmineralik und Kornbruch der NE-Metalle)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>–Mineralische Anteile an den NE-Metallkörnern bzw. NE-Metall-Schlacke-Verbunde werden miterfasst (Nachreinigung)</li> <li>–Verlust von NE-Metallen in die "magnetische Schlacke" (Angleichen an reale Aufbereitung)</li> </ul>

Wie in der Tabelle angeführt ist, haben Ergebnisse aus Bachema- und ZAR-Analyse eine verschiedene Aussage über den NE-Metallgehalt. Wenn beide Analysen durchgeführt werden, bzw. wenn die ZAR-Analysenrückstände noch mit der Bachema-Methode untersucht werden, kann bestimmt werden, wie die (Rest-) NE-Metalle in den (Rest-) Schlacken vorliegen, ob "frei", das heißt, mit der

Wirbelstromabscheidetechnik unmittelbar abscheidbar, oder in Verbund mit Schlacke (eventuell mit magnetischer Schlacke). Für die drei untersuchten Restschlacken ist unter 4.4.5 diese Verteilung auf mit Wirbelstromtechnik unmittelbar abscheidbares oder nicht abscheidbares Metall angegeben. (Siehe dazu auch 4.4.3 für die Frage der Anteile mineralischer Verschmutzung in den NE-Metallen der ZAR-Analysen.)

Im Folgenden werden Unterschiede zwischen den Methoden, soweit Daten aus den Messungen dazu vorliegen, abgehandelt.

#### **4.4.1 Unterschiedliche Abscheidung von NE-Metallfraktionen**

Mit der Bachema- bzw. BAFU-Methode werden, abgesehen vom Kornbruch, alle NE-Metalle >1 mm (bzw. üblicherweise >2 mm bei BAFU-Methode) erfasst. (Anmerkung: Bei der BAFU-Methode wird ausschließlich die Siebfraktion 0-16 mm analysiert.) Metalle in Schlackenkörnern >1 mm werden freigebrochen. Die Metallkörner werden durch die starke mechanische Belastung plattgedrückt und von mineralischen Anhaftungen befreit. Allerdings wird den Körnern eine dünne Staubschicht aufgepresst.

Bei der ZAR-Methode werden alle Körner, die potentiell am Wirbelstromabscheider "springen", erfasst. Das heißt, diese Methode liefert einen für die Wirbelstromabscheidetechnik spezifischen, "maximalen" NE-Metallgehalt. Die Körner werden erfasst, "wie sie sind", das heißt, die NE-Metallfraktionen, die gewogen werden, enthalten auch Körner mit Schlackenanhaftungen oder Verbunde aus NE-Metall und Schlacke. Die ZAR-Methode erfasst auch Körner, die unter optimalen Bedingungen "gerade noch" abtrennbar sind. (Anmerkung: Das führt dazu, dass bei den aufbereiteten Schlacken, die nur noch Reste ‚schlecht‘ abtrennbarer NE-Metallkörner enthalten, die NE-Metallfraktionen aus der ZAR-Analyse hohe Anteile mineralischer Verunreinigungen mitbringen.) Bei der ZAR-Methode werden die Proben nicht gebrochen, das heißt, die Ergebnisse gelten für den jeweiligen (Zerkleinerungs-) Zustand der Probe. Metalle, die aus Schlackenkörnern noch freigebrochen werden könnten, werden nicht erfasst. (Anmerkung: Natürlich besteht die Möglichkeit, die Rückstände der ZAR-Analyse zu brechen und ein zweites Mal zu untersuchen.)

Im Folgenden ist im Vergleich dargestellt, welche NE-Metallfraktionen bei der BAFU-, Bachema- und ZAR-Methode erfasst werden und wie der Vergleich ausfällt, wenn anstatt der originalen Mengen nur die Mengen der reinen NE-Metalle verglichen werden. In den drei folgenden Diagrammen sind jeweils als "original" die Ergebnisse direkt aus den drei Untersuchungen angegeben und unter "Nachsort." bzw. "Basis reines NE-Metall" die Ergebnisse, wenn tatsächlich nur das reine NE-Metall bestimmt wird. "Nachsort." bei BAFU- und Bachema-Methode (zur Durchführung siehe unter 3.4.1 und 3.4.2) bedeutet vor allem ein Aussortieren des VA-Stahls. Bei den Ergebnissen der ZAR-Analysen resultieren die Unterschiede zwischen "original" und "Basis reines NE-Metall" vor allem aus dem Entfernen mineralischer Verunreinigungen (zur Durchführung der Reinheitsbestimmung siehe unter 3.4.3 für die Ergebnisse 4.4.3).

Im Vergleich BAFU- mit Bachema-Methode fällt auf, dass für DHZ AG und Gebr. Lienhard AG die BAFU-Methode, auch wenn die Korngrößenklasse 1-2 mm einbezogen wird, geringere Analysenwerte liefert. (Anmerkung: Im Restschlacken-Projekt wurden bei der BAFU-Methode auch die NE-Metalle 1-2 mm mit bestimmt, um die Vergleichbarkeit mit der Bachema-Methode in allen drei Korngrößenklassen 8-16 mm, 2-8 mm und 1-2 mm herzustellen.) Das heißt, die Siebfraktionen 0-16 mm (BAFU-Analyse) der Restschlacken weisen niedrigere NE-Metallgehalte auf als die gesamten Restschlacken ohne Korngrößeneinschränkung. Offensichtlich enthalten die gröberen Fraktionen >16 mm überdurchschnittlich viel NE-Metall 1-16 mm als eingeschlossenes Metall. Bei der Restschlacke der ZAV Recycling AG ist das untersuchte Probenmaterial bei BAFU- und Bachema-

Methode gleichartig, weil die Restschlacke insgesamt eine Körnung <15 mm aufweist. Der Unterschied, der in Abb. 12 zwischen BAFU- und Bachema-Originalwerten zu sehen ist, resultiert aus einzelnen VA-Stahl-Teilen (bei 15 mm siebgängige Übergrößen) in der Bachema-Analysenprobe. Der Unterschied ist deshalb bei der Nachsortierung der originalen "NE"-Metallfraktionen verschwunden. Generell ist zu erkennen, dass die Nachsortierung der "NE"-Metallfraktionen aus BAFU- und Bachema-Analysen einen deutlichen Rückgang der Messwerte bewirkt. Die Abnahme ist bei den größeren Körnungen größer als bei den feinen, weil der VA-Stahl vermehrt in den größeren Körnungen vorkommt (siehe dazu auch Abb. 13 unter 4.4.2, Seite 42).

Mit der ZAR-Methode werden aus den Restschlacken DHZ AG und Gebr. Lienhard AG deutlich weniger NE-Metalle abgeschieden als mit der Bachema-Methode, obwohl bei der ZAR-Methode zusätzlich die Korngrößenklasse 0,2-1 mm enthalten ist. Allerdings ist von diesem feinen NE-Metall 0,2-1 mm wenig in diesen beiden Restschlacken vorhanden. Die Nachreinigung der ZAR-NE-Metalle führt noch zu einem deutlichen Rückgang der ZAR-Messwerte bei den Restschlacken der DHZ AG und Gebr. Lienhard AG. Kleinere Werte bei der ZAR-Analyse wurden, zumindest für die Körnung 1-16 mm, erwartet, weil die ZAR-Analyse die in Schlackenkörnern eingeschlossenen NE-Metalle nicht erfasst.

Bei der Restschlacke der ZAV Recycling AG verhalten sich die Messwerte von Bachema- und ZAR-Methode anders: sowohl bei den Originalwerten als auch bei den Werten für das reine NE-Metall (also nach Nachsortierung bzw. Nachreinigung) liegen hier die Ergebnisse aus der ZAR-Analyse höher als die aus der Bachema-Analyse. Erstens, weil das NE-Metall 0,2-1 mm einen großen Beitrag liefert, zweitens weil auch die reinen NE-Metalle 1-16 mm bei der ZAR-Analyse nur geringfügig weniger sind als bei der Bachema-Analyse (ca. 0,04 %-Punkte Differenz). Allerdings wurde in der Analysenvariante "ZAR-Analyse + Rückstandsanalyse" (siehe weiter unten in 4.4.5, Seite 52, Abb. 22) deutlich mehr reines NE-Metall >1 mm gefunden als bei der Bachema-Analyse mit Nachsortierung. Die Differenz beträgt ca. 0,25 %-Punkte. (In Abb. 22 wird auch deutlich, dass diese Differenz bei den aufbereiteten Nassschlacken wesentlich kleiner ist.) Wahrscheinlich wurde bei der Bachema-Analyse der ZAV-Recycling-AG-Restschlacke besonders viel NE-Metall durch Kornbruch in die Körnung <1 mm verschoben. Dafür spricht, dass bei der Bachema-Analyse der ZAV-Recycling-AG-Restschlacke besonders viel metallisches Aluminium <1 mm im Analysenrückstand gefunden wurde (siehe Abb. 21, Seite 50, die schwarzen Abschnitte der Balken mit ca. 0,3 %-Punkten Unterschied zwischen Bachema- und ZAR-Analysenvariante). Die Ursache für den hohen Schlupf von Aluminium durch Kornbruch bei der Trocken-Restschlacke ist nicht geklärt. Betrachtet man die Beschaffenheit der NE-Metalle 1-5 mm aus den ZAR-Analysen im Vergleich über die drei Restschlacken, so fällt aber auf, dass die Rest-Metalle bei ZAV-Recycling AG sehr viele feine, filigrane Plättchen enthalten, während in der gleichen Korngröße die Restmetalle aus den anderen beiden Restschlacken eher von kompakten Körnern dominiert sind (siehe die Bilder der Restmetalle unter 4.4.3; ab Seite 44).

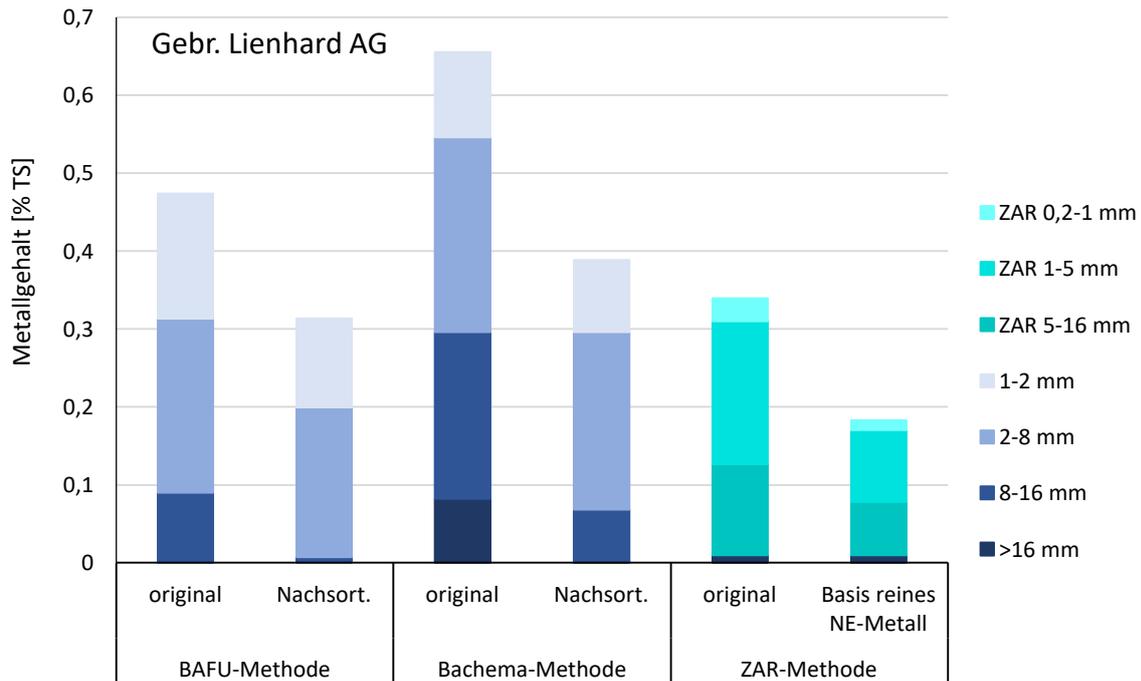


Abb. 10: Vergleich der aus der Restschlacke von Gebr. Lienhard abgetrennten und als NE-Metall ausgewiesenen Massenanteile bei den drei Analysenmethoden, original und als reines NE-Metall nach zusätzlicher Sortierung bzw. Reinigung.

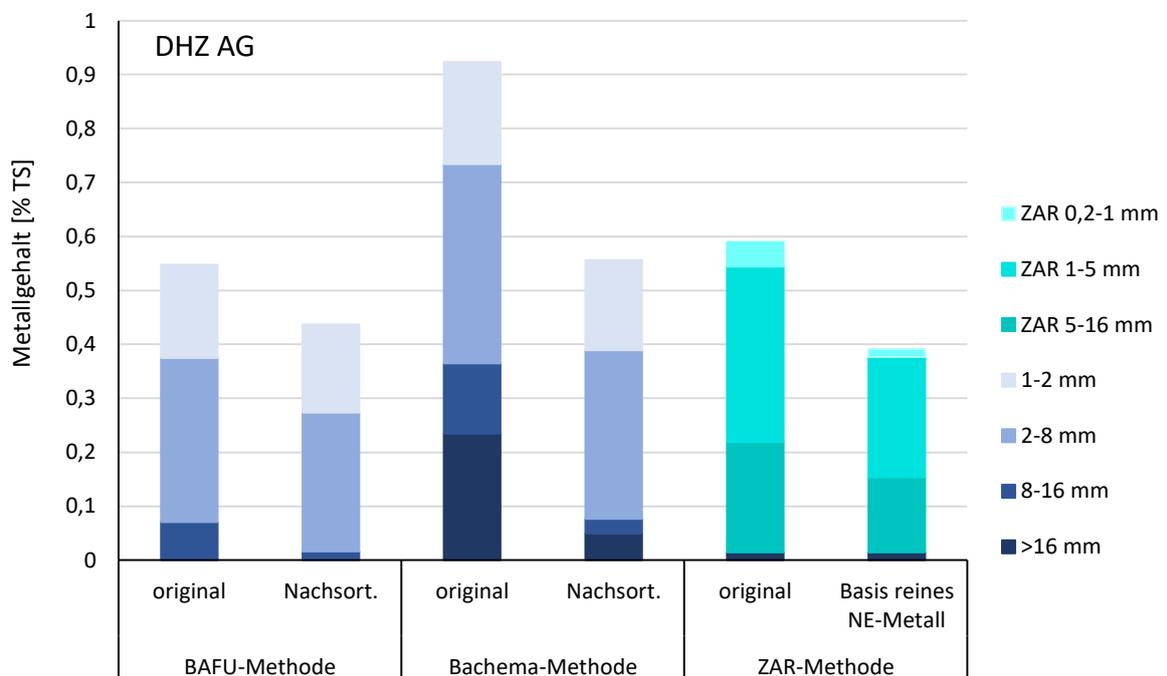


Abb. 11: Vergleich der aus der Restschlacke von DHZ AG abgetrennten und als NE-Metall ausgewiesenen Massenanteile bei den drei Analysenmethoden, original und als reines NE-Metall nach zusätzlicher Sortierung bzw. Reinigung.

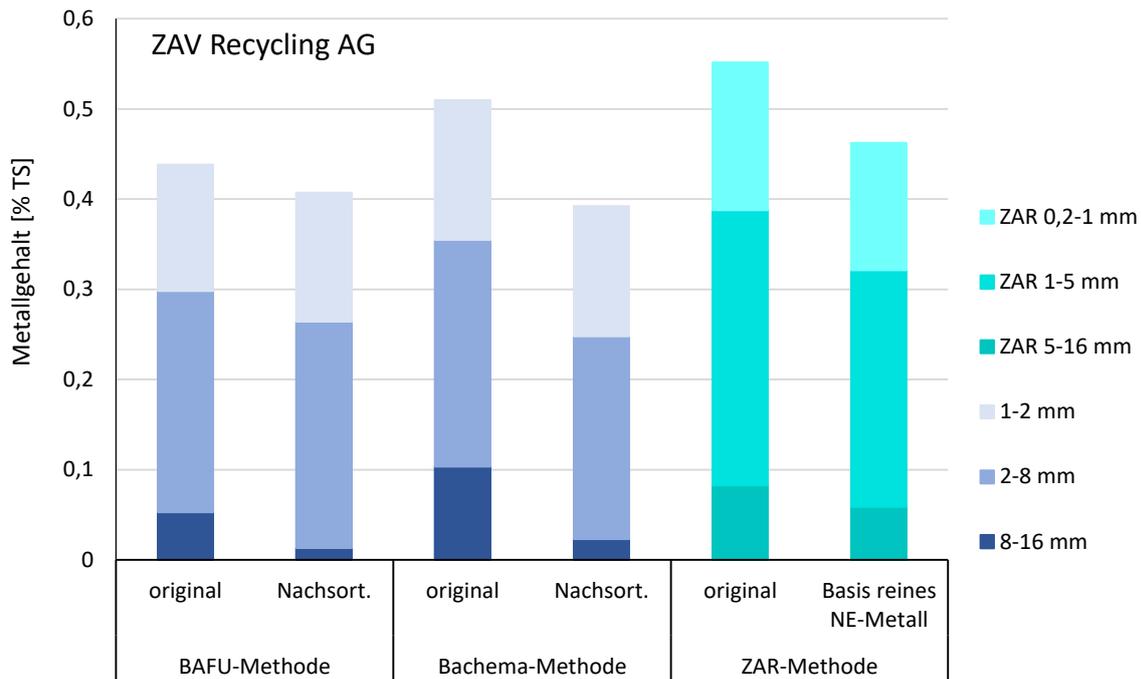


Abb. 12: Vergleich der aus der Restschlacke der ZAV Recycling AG abgetrennten und als NE-Metall ausgewiesenen Massenanteile bei den drei Analysenmethoden, original und als reines NE-Metall nach zusätzlicher Sortierung bzw. Reinigung.

#### 4.4.2 Miterfassung von VA-Stahl

Bei der Magnetsortierung der rohen Metallfraktionen im Zuge der BAFU- oder Bachema-Analyse wird das Fe-Metall abgetrennt. Auffällige Körner von Unverbranntem werden danach noch aussortiert und der Rest als NE-Metall ausgewiesen. Das heißt, auch VA-Stahl und restliche Mineralstoffkörnchen werden als NE-Metall gewogen. In der folgenden Abbildung sind die in der Nachsortierung der Metallfraktionen bestimmten Anteile reiner NE-Metalle, VA-Stahls und sonstiger Bestandteile (Mineralstoffe, Unverbranntes) ausgewiesen. Alle Anteile der NE-Metalle sind im Diagramm in blau oder türkis aufgetragen, die Anteile des VA-Stahls grün, die der sonstigen Anteile grau. (Anmerkung: In drei Fällen sind negative Anteile an sonstigen Bestandteilen ausgewiesen als graue Balken unter der x-Achse. Das kommt dadurch zustande, dass bei der Nachsortierung in den originalen Fe-Metallfraktionen NE-Metalle und VA-Stahl gefunden und umsortiert wurden. Die negativen Balken sind so zu interpretieren, dass die Höhe des Stapels für das original ausgewiesene "NE-Metall" so groß war, wie der jeweilige blau-grüne Stapel über der x-Achse abzüglich des negativen grauen Abschnitts unter der x-Achse.)

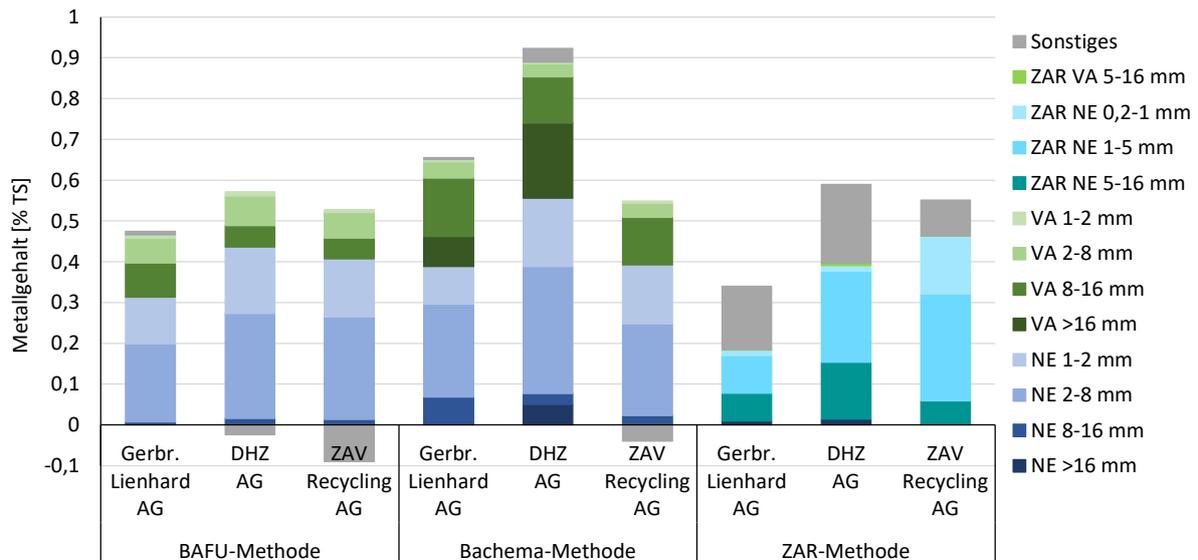


Abb. 13: Anteile reiner NE-Metalle (blau bzw. türkis) und VA-Stahl (grün) in den gewogenen Metallfraktionen der originalen BAFU-, Bachema- und ZAR-Analysen. Grau sind sonstige Anteile (siehe Text).

In den "NE"-Metallfraktionen der Bachema-Analyse ist erwartungsgemäß der höchste Anteil an VA-Stahl enthalten, weil VA-Stahl generell eher in größeren Körnungen zu finden ist und daher die Einschränkung der Korngröße auf <16 mm bei der BAFU-Analyse VA-Stahl überproportional ausschließt. Die Anteile an VA-Stahl an den originalen Analysenwerten der Bachema-Analysen liegen bei ca. 31-40 % und für die BAFU-Analyse 1-16 mm bei 25-32 % bzw. BAFU-Analyse 2-16 mm bei 30-42 % (für die Detaillerggebnisse der VA-Stahl-Gehalte siehe die tabellarischen Angaben in 4.1, 4.2 und 4.3). Der Korngrößeneffekt spielt wahrscheinlich auch eine Rolle für die vergleichsweise niedrigen VA-Stahl-Gehalte der Restschlacke der ZAV-Recycling AG, die generell eine Körnung <15 mm aufweist.

Die NE-Metallfraktionen aus den ZAR-Analysen enthalten erwartungsgemäß keine relevanten Anteile an VA-Stahl. Lediglich einzelne Stücke wurden in der Fraktion NE-Metall 5-16 mm gefunden. Die NE-Metallfraktionen der ZAR-Analysen, besonders die der aufbereiteten Nassschlacken, enthalten aber relevante Anteile mineralischer Verunreinigungen (ca. 47 % bei Gebr. Lienhard AG, ca. 34 % bei DHZ AG und ca. 16 % bei ZAV Recycling AG). Auf die Reinheit der NE-Metallfraktionen wird genauer im nächsten Punkt eingegangen.

#### 4.4.3 Reinheit der gewogenen NE-Metallfraktionen

Unter 4.4.2 sind bereits die Gehalte reiner NE-Metalle in den gewogenen Metallfraktionen der originalen BAFU-, Bachema- und ZAR-Analysen dargestellt worden (Abb. 13). Die Metalle der BAFU- und Bachema-Analysen sind wegen der starken mechanischen Beanspruchung und Verformung weitgehend frei von mineralischen Verunreinigungen. Bei der Nachsortierung werden die Fraktionen gewaschen, wodurch ein großer Teil des Staubes, der auf die Metallplättchen aufgepresst ist, entfernt wird. VA-Stahl macht bei den NE-Metallfraktionen der BAFU- und Bachema-Analysen den größten Teil der "mitgewogenen Fremdbestandteile" aus. Demgegenüber werden bei der ZAR-Methode vor allem die mineralischen Komponenten der verschmutzten NE-Metallkörner und NE-Metall-Schlacke-Verbunde als Fremdbestandteile miterfasst (gewogen). Je nachdem, wie gut das entsprechende Korn im magnetischen Wechselfeld des Abscheiders angeregt (abgestoßen) wird, kann mehr oder weniger Mineralstoff mitgeschleppt werden. Bei der ZAR-Methode ist keine mechanische Bearbeitung der Körner zum Abtrennen mineralischer Anhaftungen und zum

Auftrennen von Verbunden vorgesehen. In dieser Arbeit wurde aber eine zusätzliche Aufreinigung der ZAR-NE-Metallfraktionen durchgeführt. Die Ergebnisse davon sind im Folgenden dargestellt.

#### 4.4.3.1 NE-Metalle 5-16 mm der ZAR-Analysen

Bilder der originalen NE-Metallfraktionen 5-16 mm aus den drei Restschlacken sind hier nebeneinandergestellt:

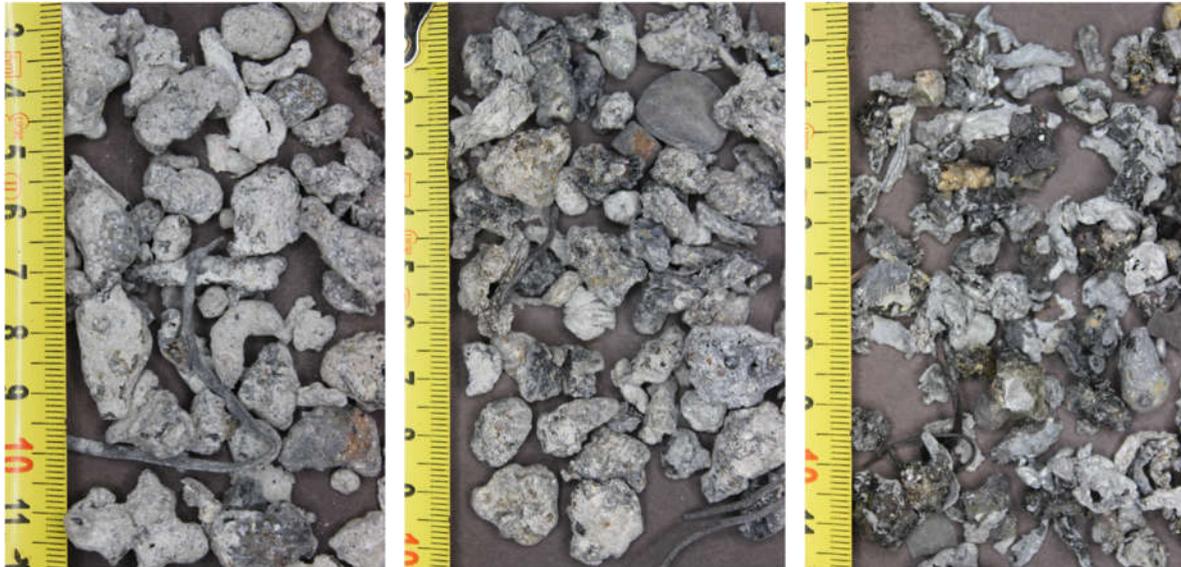


Abb. 14a bis c: NE-Metallfraktionen 5-16 mm von der ZAR-Analyse. links (a): Gebr. Lienhard AG, Mitte (b): DHZ AG, rechts (c): ZAV Recycling AG.

Es ist deutlich zu sehen, dass die NE-Metalle aus den Restschlacken von Gebr. Lienhard AG und DHZ AG hellgraue Anhaftungen tragen. Die eigentliche Beschaffenheit der Körner ist dadurch nicht sichtbar. Beim NE-Restmetall von ZAV Recycling AG sind Alu- und Buntmetallkörner unterscheidbar ebenso wie saubere und verschmutzte Körner. Die Restmetalle von ZAV Recycling AG wirken insgesamt feinkörniger und die Körner sind stärker strukturiert. Um bei der Reinheitsbestimmung ("Aufreinigen") möglichst wenig Kornbruch zu erzeugen, wurden in dieser Korngrößenklasse 5-16 mm zunächst alle sauberen Körner aussortiert und nur diejenigen mit Schlackenanhaftungen "geklopft" (zur Vorgangsweise der Nachreinigung siehe unter 3.4.3). In Abb. 15b sind beispielhaft einige saubere Körner und einige mit Schlackenanhaftungen gezeigt. Damit aus den Restmetallen von Gebr. Lienhard AG und DHZ AG ebenfalls saubere Körner ohne Schlackenanhaftungen aussortiert werden konnten, wurden die Fraktionen mit verdünntem, handelsüblichem Entkalker gewaschen. Abb. 15a zeigt unbehandelte und gewaschene Körner. Die Wirkung der Reinigung mit dem Entkalker ist abhängig vom Material der Körner. Buntmetalle werden eher sauber als Aluminium. Nach der Wäsche wurden auch aus den Fraktionen von Gebr. Lienhard AG und DHZ AG saubere Körner bzw. Körner mit geringfügigen Anhaftungen, schätzungsweise unter 5 % Massenanteil, aussortiert. Der Rest wurde weiter mechanisch behandelt, wie es unter 3.4.3 beschrieben ist.



Abb. 15a und b: linkes Bild (a): NE-Metall 5-16 mm, Gebr. Lienhard AG nach dem Waschen (linkes Häufchen) und vor dem Waschen (rechtes Häufchen); rechtes Bild (b): NE-Metall 5-16 mm, ZAV Recycling AG, saubere Körner (linkes Häufchen) und verschmutzte Körner (rechtes Häufchen).

Bei der Aufreinigung der Metallfraktionen durch Abklopfen der Körner und Absieben der sprödebrüchigen Anteile entstehen auch Metallkörner, die wesentlich kleiner sind als es der ursprünglichen Körnung 5-16 mm entspricht. In der folgenden Tabelle sind alle Fraktionen, die bei der Aufreinigung der NE-Metalle 5-16 mm entstanden sind, angeführt.

Tab. 17: Fraktionen und ihre Massenanteile bei der Reinheitsbestimmung der NE-Metalle 5-16 mm aus den ZAR-Analysen.

Fraktion von Reinheitsbestimmung	Gebr. Lienhard AG	DHZ AG	ZAV Recycling AG
	[% von NE 5-16 mm, original]	[% von NE 5-16 mm, original]	[% von NE 5-16 mm, original]
Abwaschverlust	12,4	2,9	---
VA-Stahl	1,5	2,9	1,3
NE, saubere Körner	12,3	11,6	34,2
NE, sauber geklopft >1 mm	43,4	54,7	34,1
NE, sauber geklopft 0,5-1 mm	1,0	0,6	1,9
NE, sauber geklopft 0,2-0,5 mm	1,1	0,5	0,9
<b>Summe NE, sauber &gt;0,2 mm</b>	<b>57,8</b>	<b>67,5</b>	<b>71,0</b>
Al met <0,2 mm	0,4	0,7	0,5
<b>NE total</b>	<b>58,3</b>	<b>68,2</b>	<b>71,5</b>
Fremdmaterial inkl. VA-Stahl	41,7	31,8	28,5

Es ist zu sehen, dass der Anteil Metallbruchstücke 0,5-1 mm und 0,2-0,5 mm nur einen geringen Massenanteil bei der Aufreinigung ausmacht. Auch das metallische Aluminium, das im zerklopften Rückstand <0,2 mm gemessen wurde, stellt einen (sehr) kleinen Massenanteil dar, obwohl bis zu ca. ein Drittel (bei Gebr. Lienhard AG) an zerklopfbarem Anteil <0,2 mm abgetrennt wurde. Der Schlupf an metallischem Aluminium durch Kornbruch bis <0,2 mm ist also bei dieser Art der Aufreinigung gering mit ca. 0,6 - 1 % bezogen auf das gesamte, reine NE-Metall.

Die Fraktionen 5-16 mm aus den drei Restschlacken unterscheiden sich stark. Von der Fraktion von Gebr. Lienhard AG ließ sich wesentlich mehr Masse mit Entkalker abwaschen als von der Fraktion von DHZ AG. Das war erwartet worden, weil die Körner von Gebr. Lienhard AG sichtbar deutlich dickere Anhaftungen trugen (vergl. die Fotos Abb. 14a und b). Insgesamt ist der Anteil mineralischer Verunreinigungen beträchtlich, sodass die originalen ZAR-Messwerte die Gehalte reinen Metalls kräftig überschätzen. Bei Gebr. Lienhard AG liegt der Anteil reinen NE-Metalls knapp unter 60 % des Originalwerts. Bei den beiden anderen Herkünften liegen die Metallanteile um 70 %.

#### 4.4.3.2 NE-Metalle 1-5 mm der ZAR-Analysen

Die Charakteristiken der drei Restschlacken, wie sie in der Korngrößenklasse 5-16 mm beobachtet wurden, sind auch in der Korngrößenklasse 1-5 mm ausgeprägt. Die NE-Metalle 1-5 mm von Gebr. Lienhard AG zeigen einen starken weiß-grauen Überzug (Abb. 16a rechtes Häufchen), der sich mit verdünntem Entkalker größtenteils lösen lässt (linkes Häufchen). Die Körner in der Fraktion von DHZ AG tragen optisch beurteilt weniger Anhaftungen, was auch im Anteil abwaschbarer Verunreinigungen zum Ausdruck kommt (Tab. 18, erste Zeile, "Abwaschverlust"). Die NE-Metallkörner 1-5 mm aus den aufbereiteten Nassschlacken wirken generell kompakt, wobei die eigentliche Form der Körner wegen der Anhaftungen nicht erkennbar ist. (Anmerkung: Auch die gewaschenen Metalle wirken nicht so feinteilig und filigran wie die Metalle aus der aufbereiteten Trockenschlacke.) In der Fraktion der ZAV Recycling AG sind dagegen sehr viele filigrane Teilchen geringer Dicke enthalten (Abb. 16b).



Abb. 16a und b: linkes Bild (a): NE-Metall 1-5 mm, Gebr. Lienhard AG nach dem Waschen (linkes Häufchen) und vor dem Waschen (rechtes Häufchen); rechtes Bild (b): NE-Metall 1-5 mm, ZAV Recycling AG.

VA-Stahl wurde in der Körnung 1-5 mm nicht aussortiert. Beim Bearbeiten sind keine VA-Stahl-Teile aufgefallen. Außerdem wurden die Metallproben jeweils gleich bzw. nach dem Waschen und Trocknen geklopft, ohne saubere Teilchen vorab auszusortieren (zu großer Aufwand).

Bei der Reinheitsbestimmung in der Fraktion 1-5 mm wurden relevante Anteile gereinigter NE-Metalle in der Korngrößenklasse 0,5-1 mm erhalten. Weiterer Kornbruch zu feineren Metallen 0,2-0,5 mm und metallischen Aluminiums <0,2 mm ist nur geringfügig aufgetreten (siehe Aufstellung in Tab. 18). Der Schlupf von metallischem Aluminium <0,2 mm bei dieser Bestimmung macht vom gesamten NE-Metall 0,35 % -0,6 % aus.

Die Anteile an Verunreinigungen in den NE-Metallen 1-5 mm der ZAR-Analyse sind bei den drei Restschlacken sehr verschieden. Bei den Restmetallen von Gebr. Lienhard AG beträgt der Anteil ca. die Hälfte, das heißt, dass sich der originale Analysenwert halbiert, wenn nur die reinen NE-Metalle berücksichtigt werden. Bei DHZ AG beträgt der Anteil an Verunreinigungen ca. 30 % bei ZAV Recycling AG ca. 15 %.

Tab. 18: Fraktionen und ihre Massenanteile bei der Reinheitsbestimmung der NE-Metalle 1-5 mm aus den ZAR-Analysen.

Fraktion von Reinheitsbestimmung	Gebr. Lienhard AG	DHZ AG	ZAV Recycling AG
	[% von NE 1-5 mm, original]	[% von NE 1-5 mm, original]	[% von NE 1-5 mm, original]
Abwaschverlust	28,8	10,8	---
NE, sauber geklopft >1 mm	40,9	60,9	75,7
NE, sauber geklopft 0,5-1 mm	8,4	6,2	8,9
NE, sauber geklopft 0,2-0,5 mm	0,8	1,1	1,0
<b>Summe NE, sauber &gt;0,2 mm</b>	<b>50,1</b>	<b>68,1</b>	<b>85,6</b>
Al met <0,2 mm	0,3	0,2	0,4
<b>NE total</b>	<b>50,4</b>	<b>68,4</b>	<b>86,0</b>
Fremdmaterial	49,6	31,6	14,0

#### 4.4.3.3 NE-Metalle 0,2-1 mm der ZAR-Analysen

Auch in der Körnung 0,2-1 mm weisen die Restmetalle von Gebr. Lienhard AG die stärksten sichtbaren Anhaftungen auf. Die NE-Restmetall-Körner von Gebr. Lienhard AG und DHZ AG wirken mit den Anhaftungen kompakt, während bei ZAV Recycling AG sehr viele filigrane, dünne Teilchen enthalten sind. Beim Waschen mit verdünntem Entkalker (siehe Abb. 17a und b für den Reinigungseffekt) zeigt sich bereits, dass die eigentlichen NE-Metallkörner 0,2-1 mm aus den drei Restschlacken ganz unterschiedlich beschaffen sind. Bei Gebr. Lienhard AG und insbesondere bei DHZ AG sind bereits mit dem Auge hohe Anteile NE-schwer-Komponenten zu erkennen (siehe die jeweils rechten Häufchen in Abb. 17a und b bzw. den Vergleich der drei Herkünfte in Abb. 18; dunkle Körner vor allem aus Kupfer).

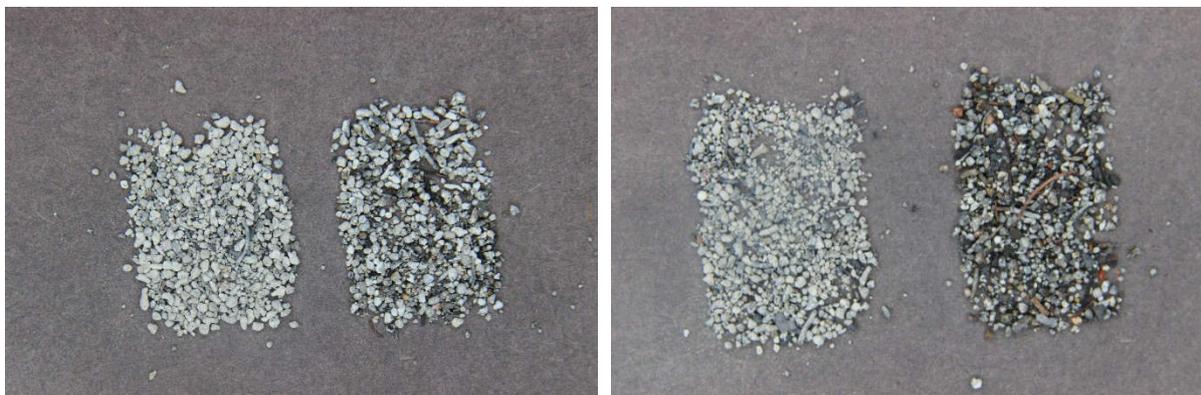


Abb. 17a und b: linkes Bild (a): NE-Metall 0,2-1 mm, Gebr. Lienhard AG original (linkes Häufchen) und nach dem Waschen (rechtes Häufchen); rechtes Bild (b): NE-Metall 0,2-1 mm, DHZ AG original (linkes Häufchen) und nach dem Waschen (rechtes Häufchen).

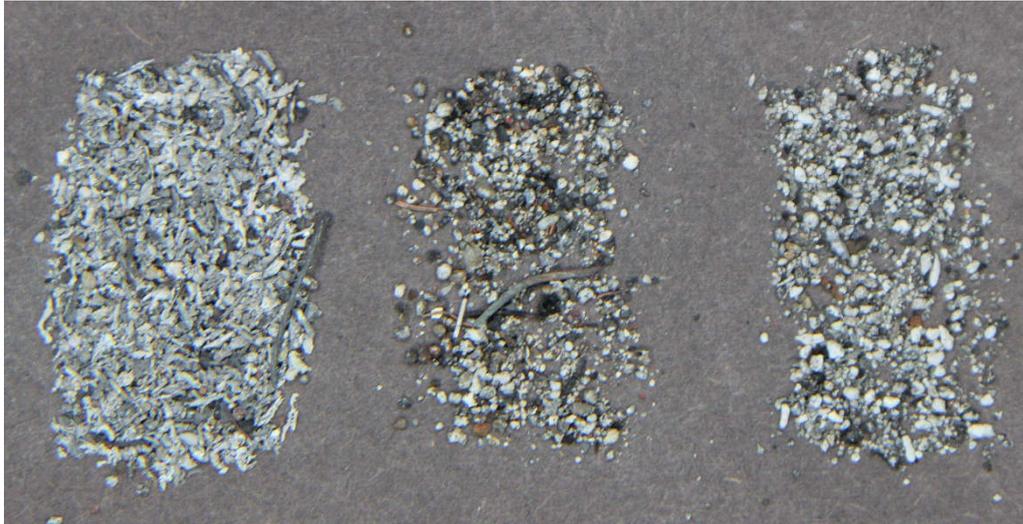


Abb. 18: NE-Metalle 0,2-1 mm von der ZAR-Analyse: ZAV Recycling AG (linkes Häufchen), DHZ AG nach dem Waschen (Mitte), Gebr. Lienhard AG nach dem Waschen (rechts).

Tab. 19: Fraktionen und ihre Massenanteile bei der Reinheitsbestimmung der NE-Metalle 0,2-1 mm aus den ZAR-Analysen.

Fraktion von Reinheitsbestimmung	Gebr. Lienhard AG	DHZ AG	ZAV Recycling AG
	[% von NE 0,2-1 mm, original]	[% von NE 0,2-1 mm, original]	[% von NE 0,2-1 mm, original]
Abwaschverlust	12,1	12,3	---
NE, sauber geklopft 0,5-1 mm	27,5	21,9	50,1
NE, sauber geklopft 0,2-0,5 mm	15,4	10,3	35,4
<b>Summe NE, sauber &gt;0,2 mm</b>	<b>42,9</b>	<b>32,1</b>	<b>85,6</b>
Al met <0,2 mm	0,3	0,1	0,7
<b>NE total</b>	<b>43,2</b>	<b>32,2</b>	<b>86,3</b>
Fremdmaterial	56,8	67,8	13,7
<b>Dichtentrennung NE-Metalle:</b>			
Alu 0,5-1 mm	15,7	9,0	42,8
<i>in % von NE 0,5-1 mm</i>	<i>57 %</i>	<i>41 %</i>	<i>85 %</i>
NE-schwer 0,5-1 mm	11,8	12,8	7,3
<i>in % von NE 0,5-1 mm</i>	<i>43 %</i>	<i>59 %</i>	<i>15 %</i>
Alu 0,2-0,5 mm	10,5	2,3	32,5
<i>in % von NE 0,2-0,5 mm</i>	<i>68 %</i>	<i>23 %</i>	<i>92 %</i>
NE-schwer 0,2-0,5 mm	4,9	7,9	2,9
<i>in % von NE 0,2-0,5 mm</i>	<i>32 %</i>	<i>77 %</i>	<i>8 %</i>
<b>Alu 0,2-1 mm</b>	<b>26,2</b>	<b>11,4</b>	<b>75,3</b>
<i>in % von NE 0,2-1 mm</i>	<i>61 %</i>	<i>35 %</i>	<i>88 %</i>
<b>NE-schwer 0,2-1 mm</b>	<b>16,7</b>	<b>20,7</b>	<b>10,3</b>
<i>in % von NE 0,2-1 mm</i>	<i>39 %</i>	<i>65 %</i>	<i>12 %</i>

Beim weiteren Aufreinigen haben sich bei den Fraktionen von DHZ AG und Gebr. Lienhard AG hohe Massenanteile als mineralische Verunreinigungen herausgestellt, nämlich ca. 68 % bei DHZ AG und ca. 57 % bei Gebr. Lienhard AG. Die Restmetall-Fraktion 0,2-1 mm der ZAV Recycling AG hat dagegen einen hohen Metallanteil und ca. 14 % Verunreinigungen. Eine Dichtentrennung in Polywolframat-

Lösung bei 3 g/ccm bestätigte die sehr verschiedenen Massenverhältnisse zwischen Aluminium und NE-schwer-Komponenten in den drei verschiedenen Herkunftten (siehe unterer Teil der Tab. 19). Der Anteil von NE-schwer am reinen NE-Metall 0,2-1 mm beträgt bei DHZ AG ca. zwei Drittel. Bei ZAV Recycling AG ist dagegen das Aluminium der Hauptbestandteil, während das NE-schwer nur 12 % ausmacht (zu möglichen Ursachen dieser Unterschiede siehe die Erläuterungen unter 4.5).

#### 4.4.4 Gegenüberstellung der NE-Metall-"Gesamtgehalte" aus den verschiedenen Messmethoden

Aus den Analyseergebnissen von Bachema- bzw. ZAR-Analyse samt der jeweiligen Nachsortierung bzw. Nachreinigung und den Rückstandsanalysen können näherungsweise NE-Metallgesamtgehalte durch Aufsummieren errechnet werden. Bei der BAFU-Methode sind es Näherungswerte für die NE-Metallgesamtgehalte in der Restschlacken-Siebfraktion 0-16 mm. In den Näherungen fehlen die NE-schwer-Fractionen <1 mm bei Ausgangsdaten von Bachema- und BAFU-Analyse bzw. das NE-schwer <1 mm in den Rückständen der ZAR-Analyse. Die absoluten Werte für Gehalte an NE-schwer-Metallen <1 mm liegen im Bereich weniger hundertstel %-Punkte. (Anmerkung: vergl. dazu die Ergebnisse in den Diagrammen Abb. 19 bis Abb. 21 für ZAR-NE-Metall 0,2-1 mm oder die Ergebnisse für die ZAR-Analysen unter 4.1 bis 4.3; Die Anteile NE-schwer im ZAR-NE-Metall 0,2-1 mm sind bei den drei Restschlacken sehr verschieden, wie in Tab. 19 ersichtlich ist. Es ergeben sich daraus Werte von 0,005 % TS (Gebr. Lienhard AG), 0,009 % TS (DHZ AG) und 0,02 % TS (ZAV Recycling AG). Selbst, wenn die ZAR-Analyse in dieser feinen Körnung nur eine schlechte Abscheideleistung hätte, wären die tatsächlichen Gehalte NE-schwer 0,2-1 mm im Bereich Hundertstel %-Punkte TS zu erwarten.) Wegen der Lücke beim NE-schwer<1 mm wird die Bezeichnung "Gesamtgehalte" jedenfalls unter Anführungszeichen gesetzt.

In den folgenden Diagrammen ist jeweils für jede Analysenvariante die Summe aller Werte aus den Analysen und Rückstandsanalysen als Säulenstapel eingezeichnet.

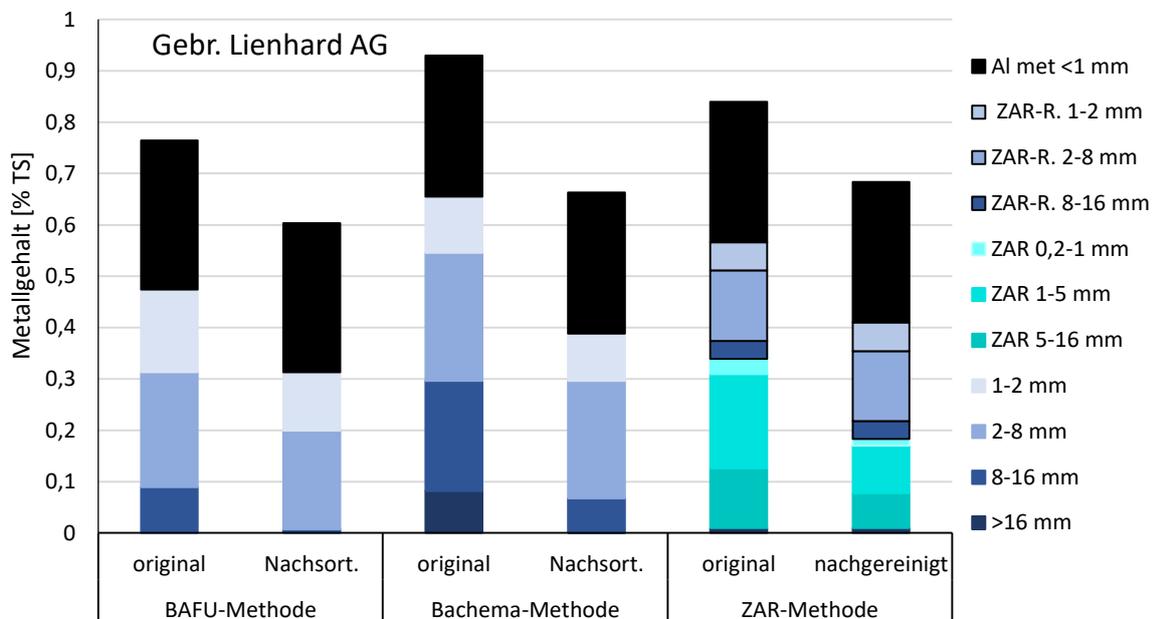


Abb. 19: Anteile des gewogenen NE-Metalls (blau bzw. türkis) und des feinen metallischen Aluminiums (schwarz) bei den originalen BAFU-, Bachema- und ZAR-Analysen der Restschlacke Gebr. Lienhard AG. Angaben jeweils für die originalen Werte und nach der Nachsortierung bzw. Nachreinigung der NE-Metall-Fractionen.

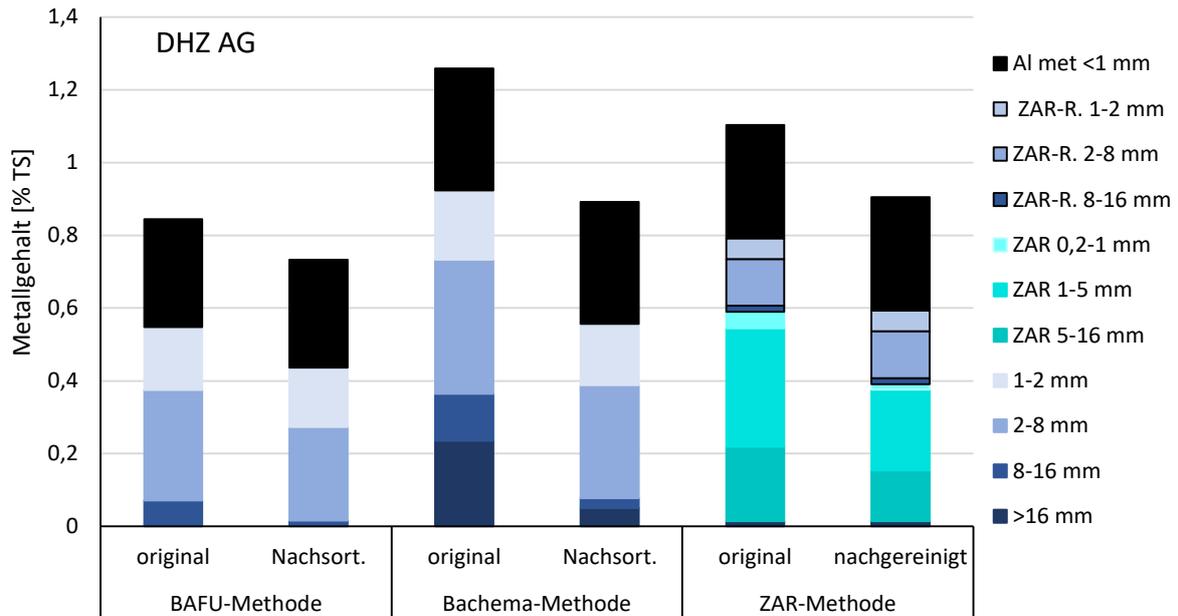


Abb. 20: Anteile des gewogenen NE-Metalls (blau bzw. türkis) und des feinen metallischen Aluminiums (schwarz) bei den originalen BAFU-, Bachema- und ZAR-Analysen der Restschlacke DHZ AG. Angaben jeweils für die originalen Werte und nach der Nachsortierung bzw. Nachreinigung der NE-Metall-Fractionen.

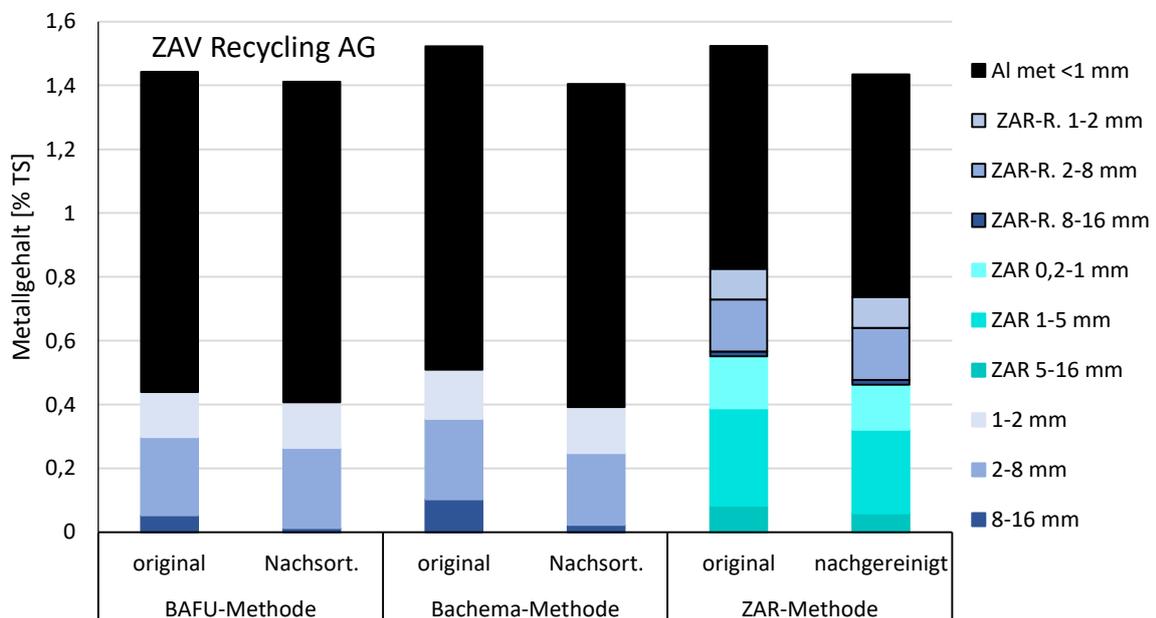


Abb. 21: Anteile des gewogenen NE-Metalls (blau bzw. türkis) und des feinen metallischen Aluminiums (schwarz) bei den originalen BAFU-, Bachema- und ZAR-Analysen der Restschlacke von ZAV Recycling AG. Angaben jeweils für die originalen Werte und nach der Nachsortierung bzw. Nachreinigung der NE-Metall-Fractionen.

Ein ganzer Stapel entspricht jeweils dem "Gesamtgehalt". Bei den Ergebnissen der ZAR-Analysen sind die Beiträge >1 mm aus den Rückstandsanalysen jeweils schwarz umrandet eingezeichnet. Das sind die in Schlackenkörnern eingeschlossenen NE-Metalle bzw. NE-Metalle mit Anhaftungen von

magnetischer Schlacke (daher in die magnetische Schlacke transferiert), die mit dem Wirbelstromabscheider nicht abgeschieden werden konnten.

Die "Gesamtgehalte", die über die ZAR-Analysenvariante ermittelt wurden, weisen bei den drei Restschlacken verschiedene Charakteristiken auf. Die Gehalte an NE-Metallen, die unmittelbar mit der Wirbelstromabscheidetechnik abscheidbar sind, bewegen sich, gemessen als reines Metall (türkise Balken jeweils ganz rechts in den Diagrammen), im Bereich von ca. 0,2 % TS (Gebr. Lienhard AG) bis 0,45 % TS (ZAV Recycling AG). Die Korngrößenklasse 0,2-1 mm liefert dazu bei den Restschlacken von Gebr. Lienhard AG (0,012 % TS) und DHZ AG (0,015 % TS) sehr kleine Beiträge, bei ZAV Recycling AG aber etwa 10-mal so viel (0,14 % TS). Auch das feinkörnige, mit der Wasserstoff-Methode bestimmte, metallische Aluminium (<0,2 mm bzw. <1 mm, schwarze Balken) ist in der Restschlacke der ZAV Recycling AG in viel größerem Anteil enthalten als in den beiden anderen Restschlacken (ca. 0,7 % TS bei ZAV Recycling AG gegenüber ca. 0,3 % TS bei den beiden anderen). Die Gehalte an eingeschlossenen bzw. mit magnetischen Anhaftungen verschmutzter NE-Metalle (schwarz umrahmte, blaue Balken) unterscheiden sich mit Werten zwischen 0,20 % TS (DHZ AG), 0,22 % TS Gebr. Lienhard AG und 0,27 % ZAV Recycling AG weniger stark.

Die Bachema-Analysenvariante umfasst mit Ausnahme der wirbelstromabscheidbaren NE-schwer-Metalle 0,2-1 mm dieselbe Menge an NE-Metallen wie die ZAR-Analysenvariante. Die Übereinstimmung der "Gesamtgehalte" aus beiden Varianten ist für alle drei Restschlacken sehr gut (allerdings nur für die Varianten auf Basis reiner NE-Metalle). Die relativen Unterschiede betragen gemessen an den "Gesamtgehalten" aus der Bachema-Variante +3 % (Gebr. Lienhard AG), +1 % (DHZ AG) und +2 % ZAV Recycling AG.

Es zeigt sich, dass bei den Restschlacken der Gebr. Lienhard AG und DHZ AG die Mengen reiner NE-Metalle >1 mm, die bei den Analysen abgeschieden werden konnten, in der ZAR- und Bachema-Variante sehr ähnlich sind. Bei der Restschlacke der ZAV-Recycling AG ist dagegen der Anteil des abgeschiedenen NE-Metalls >1 mm in der ZAR-Variante wesentlich höher als in der Bachema-Variante (vergl. in den Diagrammen oben die bunten Stapel exkl. der schwarzen und helltürkisen Abschnitte). Bei Gebr. Lienhard AG sind die beiden Werte gleich, +0,0 %, bei DHZ AG die ZAR-Variante etwas höher, +11 % und viel höher +52 % bei ZAV Recycling AG. Wahrscheinlich wird der Unterschied durch verschieden starken Kornbruch vor allem von filigranen Aluminium-Teilchen verursacht. Dafür spricht, dass bei ZAV Recycling AG auch sehr viel mehr metallisches Aluminium <1 mm in den Analysenrückständen der Bachema-Analysenvariante gefunden wurde als in den Rückständen der ZAR-Analysenvariante (vergl. Höhe der schwarzen Abschnitte in den Diagrammen oben).

Mit Hilfe der bei diesen Analysen zusätzlich durchgeführten Dichtentrennung bei den NE-Metallen 0,2-1 mm in Aluminium und NE-schwer-Komponenten lässt sich der Aluminium-Kornbruch für die NE-Metallfracht der ZAR-NE-Metalle 1-16 mm berechnen. (Anmerkung: Die Differenz aus Al met <1 mm, Bachema-Variante und Al met <1 mm + ZAR-Alu 0,2-1 mm aus der ZAR-Variante beschreibt die Menge des bei der Bachema-Variante zusätzlich auf <1 mm gebrochenen Aluminiums.) Dieses zusätzliche metallische Aluminium <1 mm in den Rückständen der Bachema-Analysen bezogen auf das reine NE-Metall 1-16 mm der ZAR-Analyse macht bei der Restschlacke der ZAV Recycling AG ca. 60 % aus. Bei den Restschlacken von Gebr. Lienhard AG (-4 %) und DHZ AG (+5 %) liegen die dieser Art berechneten Werte für den Kornbruch um Null (daher negativer Wert möglich durch Ungenauigkeit der Analysen). Es scheint, als ob, übereinstimmend mit dem optischen Eindruck, die NE-Restmetalle 1-16 mm von ZAV Recycling AG tatsächlich filigraner und brüchiger sind als die entsprechenden Fraktionen aus den aufbereiteten Nassschlacken.

#### 4.4.5 Gehalte an NE-Metallen >1 mm nach ZAR-Methode versus Gesamtgehalte NE-Metalle >1 mm

Für die Korngrößen über 1 mm liegen sowohl Werte für die unmittelbar wirbelstromabscheidbaren NE-Metalle vor als auch für die Gesamtgehalte (d.h., inklusive des in Schlacke eingeschlossenen NE-Metalls bzw. NE-Metalls mit magnetischen Schlackenanhäufungen). Der Gesamtgehalt der NE-Metalle >1 mm kann auf zwei Arten bestimmt werden, entweder durch die Bachema-Analyse samt Nachsortierung oder durch die ZAR-Analyse samt Nachreinigung und der zusätzlichen Analyse der ZAR-Probenrückstände. In der Abb. 22 sind für alle drei Restschlacken jeweils die Ergebnisse aus beiden Analysenvarianten aufgetragen. Wie bereits oben unter 4.4.4 ausgeführt geben die beiden Analysenvarianten bei den aufbereiteten Nassschlacken gut übereinstimmende Gesamtgehalte für das NE-Metall >1 mm. Bei der Restschlacke der ZAV Recycling AG scheint es aber bei der Bachema-Analyse zu deutlich mehr Kornbruch zu kommen als in der Variante mit ZAR-Analyse samt Rückstandsanalyse. Der Analysenwert in der Bachema-Analyse ist deutlich tiefer als jener aus der ZAR-Analyse samt Rückstandsanalyse. Ob die Bachema-Analyse einen gleichen oder ähnlichen Analysenwert liefert wie die wesentlich aufwendigere ZAR-Analyse samt Nachreinigung und Rückstandsanalyse, scheint also stark von der Beschaffenheit der NE-Metalle in den Restschlacken abhängig zu sein.

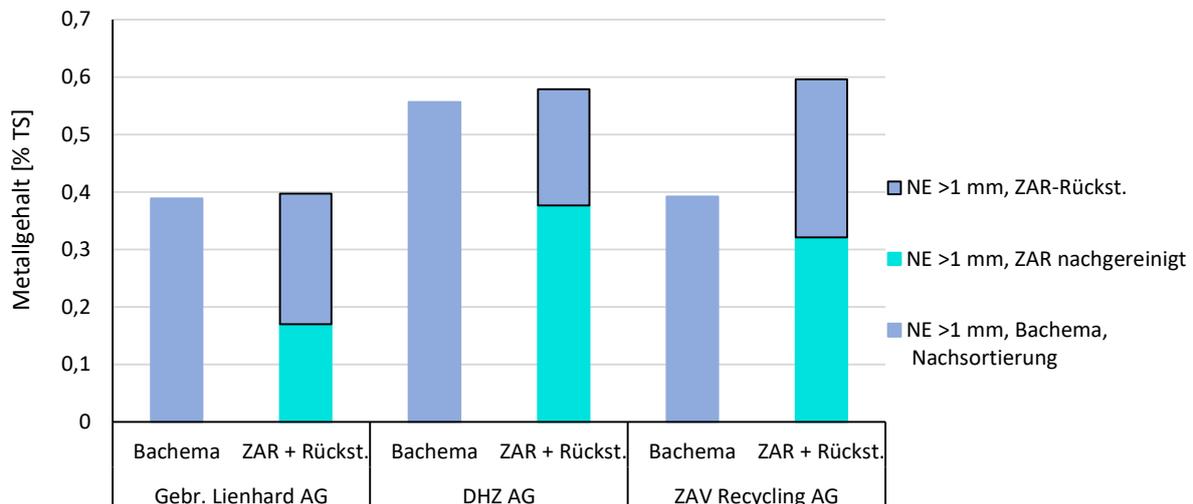


Abb. 22: Analyseergebnisse für die NE-Metalle >1 mm in den drei verschiedenen Restschlacken: reines NE-Metall aus der Bachema-Analyse samt Nachsortierung gegenüber reines NE-Metall aus der ZAR-Analyse (samt Nachreinigung) plus der reinen NE-Metalle aus den ZAR-Rückstandsanalysen.

Auf der Basis reiner NE-Metalle sind die Anteile wirbelstromabscheidbarer NE-Metalle >1 mm am gesamten NE-Metall >1 mm 43 % bei Gebr. Lienhard AG, 65 % bei DHZ AG und 54 % bei ZAV Recycling AG.

#### 4.4.6 Fazit aus dem Methodenvergleich

##### **BAFU-Methode versus Bachema-Methode**

Die BAFU-Methode charakterisiert nur die Probenfraktion <16 mm. Gemessen wird der Gehalt an "NE"-Metallen (inkl. VA-Stahl) der Körnung 2-16 mm. Die Bachema-Methode charakterisiert die Gesamtprobe mit dem Gehalt an "NE"-Metallen >1 mm (ebenfalls inklusive VA-Stahl). Die Körnung 1-2 mm hat im Restmetallgesamtgehalt eine relativ große Bedeutung. Wenn die BAFU-Methode die NE-Metalle 1-2 mm mitberücksichtigte, würden die Messwerte bei den drei untersuchten Restschlacken im Durchschnitt um ca. 50 % steigen.

Die Beschränkung der BAFU-Analyse auf die Probenfraktion <16 mm führt bei den NE-Metallen 2-16 mm zu niedrigeren Werten im Vergleich zur Analyse der Gesamtprobe (Bachema-Analyse). Bei den beiden untersuchten Restschlacken mit Anteilen >16 mm beträgt der Unterschied für das NE-Metall 2-16 mm ca. +25 % bis +50 % zwischen BAFU- und Bachema-Analyse. Offensichtlich sind in den Restschlacken die Gehalte an NE-Metallen 2-16 mm in den Probenfraktionen <16 mm niedriger als die Gehalte eingeschlossener NE-Metalle 2-16 mm in den Siebfraktionen >16 mm. Insofern entsteht für grobkörnige Restschlacken mit Anteilen >16 mm bei der Analyse mit der BAFU-Methode ein Vorteil systematisch niedrigerer Messwerte verglichen mit Restschlacken ohne Anteile >16 mm.

##### **VA-Stahl-Anteile in den Messwerten von BAFU-Methode und Bachema-Methode**

VA-Stahl wird bei den BAFU- und Bachema-Analysen wegen des nur schwachen Ferro-Magnetismus zum größten Teil in die NE-Metallfraktionen gelenkt. Wegen der niedrigen NE-Metallgehalte der Restschlacken trägt der VA-Stahl relevant zu den NE-Metall-Messwerten der BAFU- und Bachema-Analysen bei. Die Anteile, die vom VA-Stahl verursacht werden, liegen bei den hier untersuchten Restschlacken zwischen 25 % und 42 %. Das heißt, die eigentlichen NE-Metallgehalte werden auf Grund der Miterfassung des VA-Stahls bei BAFU- und Bachema-Analyse zum Teil kräftig überschätzt.

##### **Verunreinigung der NE-Metallfraktionen bei der ZAR-Analyse**

In den Restschlacken befinden sich hauptsächlich noch jene NE-Metallkörner, die schlecht abscheidbar sind. Das sind magnetische NE-Körner (Verschmelzung mit Fe-Metallen), NE-Körner mit mineralischen Anhaftungen und NE-Metall-Schlacke-Verbunde. Die NE-Metallfraktionen, die bei der ZAR-Analyse gebildet werden, können daher in erheblichem Umfang mineralische Anteile enthalten. Die Verunreinigungen können in einer aufwendigen Prozedur entfernt werden, um das reine NE-Metall erfassen zu können. Bei den drei untersuchten Restschlacken machen die Anteile reiner NE-Metalle in den NE-Metallfraktionen 0,2-16 mm der ZAR-Analysen 53 % bei Gebr. Lienhard AG, 65 % bei DHZ AG und 84 % bei ZAV Recycling AG aus. Das heißt, dass die ZAR-Analyse ohne Nachreinigung der NE-Metallfraktionen, sprich ohne Berücksichtigung der Verunreinigungen die Gehalte stark überschätzen kann.

##### **ZAR- und Bachema- Analyse zur Bestimmung der NE-Metalle >1 mm**

Bei der Analyse der Restschlacken von ZAV Recycling AG wurde mit der Bachema-Analyse deutlich weniger NE-Metall >1 mm gefunden als mit der ZAR-Analyse plus Rückstandsanalyse (Anmerkung: sämtliche Analysen mit Nachsortierung bzw. mit Nachreinigung der NE-Metallfraktionen). Es wird angenommen, dass die schonendere Behandlung der Metalle bei der ZAR-Analyse gegenüber der Bachema-Analyse in Kombination mit den filigranen Rest-NE-Metallen diese Differenz verursacht hat. Bei der Analyse der aufbereiteten Nassschlacken wurde dagegen eine gute Übereinstimmung zwischen Bachema-Analyse und ZAR-Analyse plus Rückstandsanalyse festgestellt. Das Ausmaß des NE-Metall-Kornbruchs und damit möglicher Minderbefunde bei der Bachema-Analyse scheint also stark von der Beschaffenheit der Restschlacke bzw. der enthaltenen Restmetalle abzuhängen. Die Bestimmungsprozedur mit geringem Kornbruch via ZAR-Methode, Aufreinigung der ZAR-NE-

Fractionen und Analyse der ZAR-Analysenrückstände ist sehr aufwendig. Damit ist insgesamt die derzeitige Analytik der NE-Restmetallgehalte >1 mm wenig zufriedenstellend.

#### 4.5 Vergleich der drei untersuchten Restschlacken

Durch die verschiedenen Analysemethoden, die in Kombination eingesetzt wurden, können die Restschlacken auf verschiedenen Ebenen verglichen werden. (Anmerkung: Nachdem nicht bekannt ist, wie hoch die NE-Metallgehalte am Eingang der Schlackenaufbereitungsanlagen waren, sind Schlüsse auf die Wirkungsgrade der NE-Metall-Abtrennung bei den einzelnen Anlagen nicht möglich.)

##### Potentiell mit Wirbelstromabscheidetechnik abtrennbares NE-Metall

In der folgenden Abbildung sind die Gehalte an NE-Metallen, die mit der ZAR-Analyse aus den Proben abgeschieden wurden, für die drei Schlacken nebeneinandergestellt. Eingezeichnet sind sowohl die originalen Werte der ZAR-Analysen als auch die Werte, die durch die Nachreinigung der NE-Metallfraktionen bestimmt wurden. (Anmerkung: Die originalen Messwerte entsprechen den Massenanteilen wirbelstromabscheidbarer Körner inklusive deren mineralischer Anhaftungen bzw. inklusive des mineralischen Anteils von Metall-Schlacke-Verbunden. Die Messwerte "Basis reines NE-Metall" entsprechen den Anteilen gerechnet als reines NE-Metall. Zu den Details der Reinheitsbestimmung siehe 4.4.3.) Auffällig ist hier das Mengenverhältnis zwischen den einzelnen Korngrößenklassen. Während die Restschlacke DHZ AG insgesamt mehr NE-Metall als die Restschlacke der Aufbereitung Gebr. Lienhard enthält, dieses aber in einem sehr ähnlichen Verhältnis der Korngrößenklassen untereinander, unterscheidet sich die Restschlacke der ZAV Recycling AG durch einen viel größeren Anteil an NE-Metall 0,2-1 mm bzw. kleineren Anteil NE-Metall 5-16 mm. Wie in 4.4.3.3 angeführt unterscheiden sich nicht nur die Gehalte an NE-Metall 0,2-1 mm stark, sondern auch die Beschaffenheit der NE-Metalle. Die Fraktion von ZAV Recycling AG besteht zu ca. 85 % aus Aluminium (und 15 % NE-schwer), während bei DHZ AG das NE-schwer mit 65 % den größeren Anteil ausmacht (35 % Aluminium). Die Zusammensetzung bei Gebr. Lienhard AG liegt dazwischen mit 61 % Aluminium und 39 % NE-schwer.

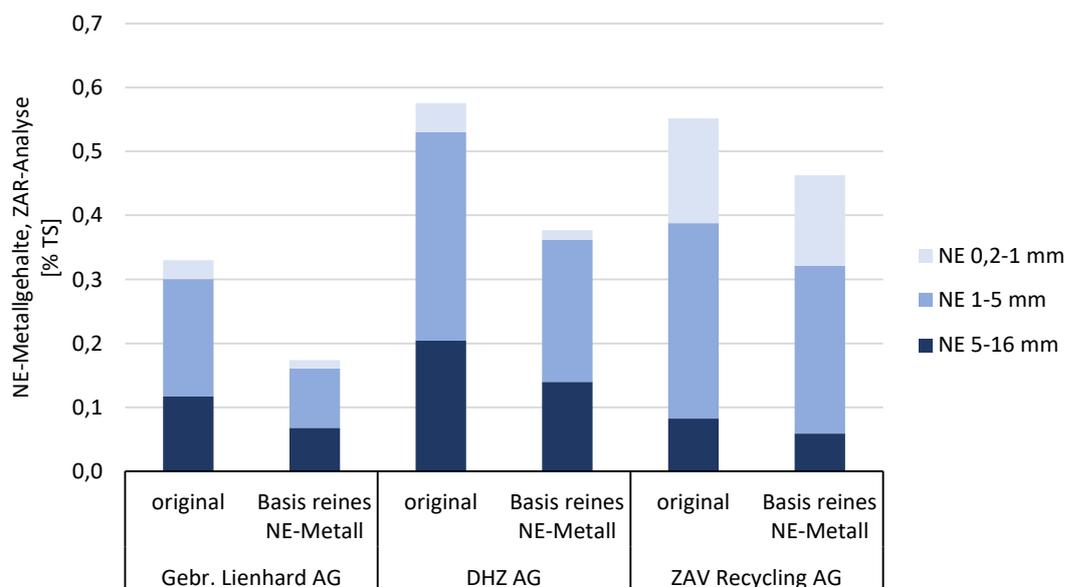
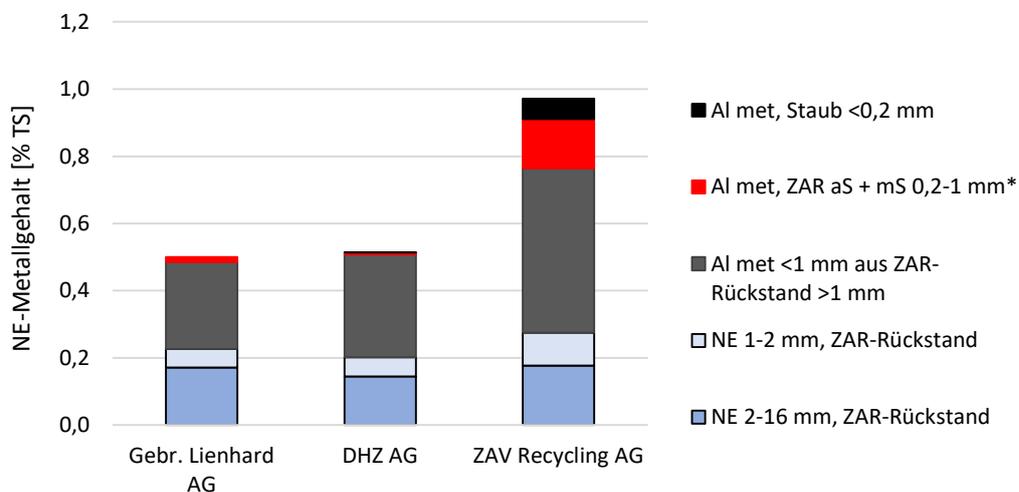


Abb. 23: Vergleich der Gehalte potentiell mit der Wirbelstromabscheidetechnik abtrennbarer NE-Metalle. (ZAR-Analysen)

### Restliches, nicht mit der Wirbelstromabscheidetechnik abtrennbares NE-Metall

Bei den nicht mit der Wirbelstromabscheidetechnik erfassbaren Rest-NE-Metallen (Abb. 24) weisen die Restschlacken von DHZ AG und Gebr. Lienhard AG sehr ähnliche Gehalte auf. (Anmerkung: Das sind die NE-Metalle, die bei der Analyse der ZAR-Rückstände erfasst werden.) Diese NE-Metalle sind in diesen beiden Restschlacken auch sehr ähnlich auf die einzelnen Korngrößen verteilt. Bei ZAV Recycling AG ist der Gehalt an nicht abscheidbaren NE-Metallen dagegen fast doppelt so hoch, obwohl die Restschlacke insgesamt feiner aufgebrochen ist als die beiden aufbereiteten Nassschlacken (<15 mm bei ZAV Recycling AG im Gegensatz zu ungefähr <40 mm bei den Nassschlackenaufbereitern). Der Gehalt an eingeschlossenen Metallen 2-16 mm (im Diagramm mit "ZAR-Rückstand" gekennzeichnet) ist dabei aber sehr ähnlich. Der Unterschied kommt vor allem von den Gehalten eingeschlossener Metalle 1-2 mm und dem metallischen Aluminium <1 mm, das in den diversen Probenrückständen mit der Wasserstoff-Methode gemessen wurde (Summe aus grauen, roten und schwarzen Abschnitten). Diese Gehalte feiner NE-Metalle sind bei der Restschlacke der ZAV Recycling AG etwa doppelt so hoch wie bei den aufbereiteten Nassschlacken.



aS, mS...Rückstandsfractionen aus der ZAR-Analyse: „aufbereitete Schlacke“ und „magnetische Schlacke“

\* bei den Daten von ZAV Recycling AG ist der Teil mS 0,2-1 mm im grauen Balken „Al met <1 mm aus ZAR-Rückstand >1 mm“ enthalten

Abb. 24: Vergleich der Gehalte an nicht mit der Wirbelstromabscheidetechnik abtrennbaren NE-Metallen (vor allem eingeschlossenes Metall).

Bei ZAV Recycling AG wurde die magnetische Schlacke 0,2-15 mm ohne einen Korngrößenschnitt bei 1 mm untersucht. Deshalb ist ein Teil der Fracht an metallischem Aluminium, die eigentlich dem roten Abschnitt der magnetischen Schlacke 0,2-1 mm zugerechnet werden müsste, hier dem grauen zugeordnet. Jedenfalls ist ersichtlich, dass bei den aufbereiteten Nassschlacken die grauen Anteile, also das in größeren Schlackenkörnern eingeschlossene, feine Aluminium bei weitem die größten Anteile der nicht abtrennbaren Aluminium-Frachten ausmacht. In den primären Feinfraktionen 0,2-1 mm (rote Abschnitte) und den Stäuben <0,2 mm (schwarz) der aufbereiteten Nassschlacken ist kaum metallisches Aluminium zu finden (die entsprechenden Balken sind im Diagramm daher kaum sichtbar). Bei der Restschlacke der ZAV Recycling AG finden sich dagegen bedeutende Anteile metallischen Aluminiums in der primären Körnung <1 mm. Der Anteil ist im Diagramm noch unterschätzt, weil auf Grund der vereinfachten Analyse (wie am Anfang des Absatzes erwähnt) der rote Abschnitt zugunsten des grauen zu klein ausfällt.

Die große Differenz beim feinen NE-Metall <1 mm deutet wahrscheinlich auf einen systematischen Unterschied zwischen aufbereiteten Nass- und Trockenschlacken hin. Der Unterschied wird

besonders auch beim Betrachten der einzelnen Schlackenfraktionen deutlich. Der Triage-Staub von ZAV Recycling AG enthält ca. 0,8 % metallisches Aluminium. Dieser Staub wird am Eingang der Aufbereitung bei ZAV Recycling AG abgetrennt (das heißt, der Triage-Staub enthält minimal Aluminiumbruchkorn oder -abrieb). Die Stäube <0,2 mm, die aus den aufbereiteten Nassschlacken bei der ZAR-Analyse abgeseibt wurden, enthalten kein nachweisbares metallisches Aluminium (Gebr. Lienhard AG) bzw. nur 0,01 % (DHZ AG). Der Vergleich der "aufbereiteten" Schlacken 0,2-1 mm aus den ZAR-Analysen fällt ähnlich aus: jene der ZAV Recycling AG enthält 0,9 % metallisches Aluminium gegenüber 0,04 % bei DHZ AG und 0,1 % bei Gebr. Lienhard AG.

### "Gesamtgehalte" an NE-Metallen

In der Abb. 25 sind die "Gesamtgehalte" gegenübergestellt. Es ist ersichtlich, dass NE-Metalle >16 mm auch bei den größeren Restschlacken von Gebr. Lienhard AG und DHZ AG keine Rolle als Restmetall spielen. Das potentiell noch ohne Brechen der Schlacken wirbelstromabscheidbare NE-Metall (im Diagramm mit "ZAR" gekennzeichnet, von der Bezeichnung der Analysenmethode) ist hier auf die Klassen 1-16 mm und 0,2-1 mm aufgeschlüsselt.

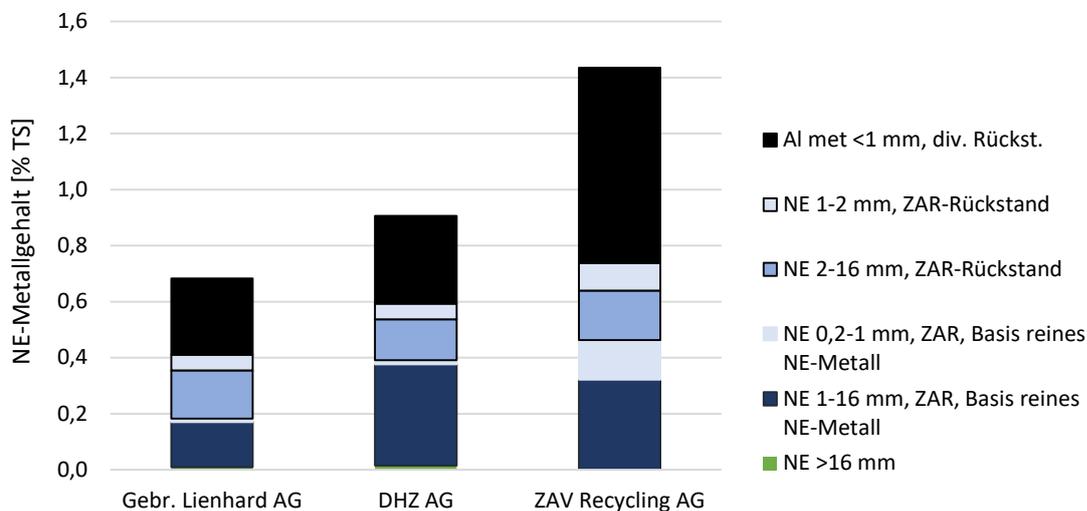


Abb. 25: Vergleich der "Gesamtgehalte" an NE-Metallen, aufgeschlüsselt.

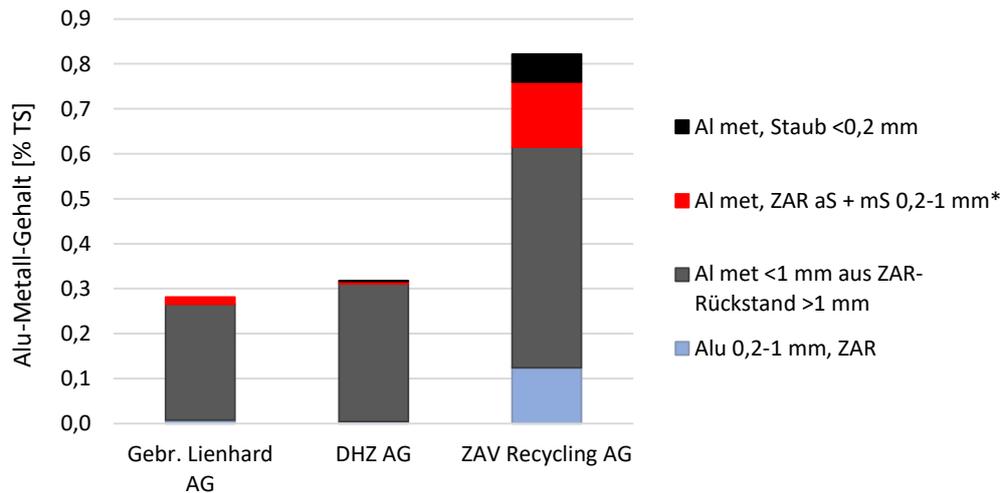
Insgesamt unterscheiden sich die drei untersuchten Restschlacken deutlich. Die Restschlacken von der Aufbereitung Gebr. Lienhard AG und DHZ AG weisen sehr verschiedene Gehalte potentiell mit der Wirbelstromabscheidetechnik noch abtrennbarer NE-Metalle 0,2-16 mm auf (0,17 % TS zu 0,38 % TS, angegeben auf Basis reiner NE-Metalle). Die Restschlacke der ZAV Recycling AG liegt mit dem Anteil potentiell abtrennbarer NE-Metalle (0,46 % TS) etwas über dem Wert von DHZ AG, wobei das Metall aber deutlich feinkörniger ist als bei den beiden aufbereiteten Nassschlacken. Im Körnungsbereich 1-16 mm liegt der Restmetallgehalt von ZAV Recycling AG etwas unter dem von DHZ AG, im Körnungsbereich 0,2-1 mm ist der Gehalt bei ZAV Recycling AG aber vielfach höher als bei den beiden anderen Aufbereitern. Metallisches Aluminium <1 mm in Schlackenstaub <0,2 mm und diversen feinen Analysenrückstandsfraktionen <1 mm (schwarze Abschnitte) ist bei der Restschlacke von ZAV Recycling AG ebenfalls viel stärker vertreten als bei den aufbereiteten Nassschlacken (siehe dazu auch die nähere Aufschlüsselung der Frachten in Abb. 24).

Durch die hohen Anteile feiner NE-Metalle insbesondere feinen metallischen Aluminiums <1 mm ergibt sich bei ZAV Recycling AG gegenüber den beiden anderen Restschlacken ein viel höherer NE-Metall-"Gesamtgehalt". Die Ursache für den großen Unterschied im Feinkornbereich wurde nicht untersucht. Prinzipiell können folgende Faktoren als Möglichkeiten angeführt werden:

- unterschiedliche Gehalte bzw. Korngrößenverteilungen der NE-Metalle in den rohen Schlacken,
- unterschiedliche Abscheidegrade bei der Schlackenaufbereitung,
- Korrosionsverluste an Aluminium im Austrag bzw. während der Zwischenlagerung bei den Nassschlacken,
- unterschiedlicher Kornbruch oder Abrieb bei Transport und Aufbereitung.

Bei den Rohschlackenanalysen im Zuge des Schlackenprojektes wurden im November 2021 Gehalte an NE-Metall 0,2-1 mm von 0,11 % TS bei den Nassschlacken (Limeco und KVA Winterthur) und 0,12 % (KEZO) bis 0,23 % (ERZ) gemessen. Das Verhältnis Aluminium zu NE-schwer wurde in diesen Fraktionen nicht bestimmt. Die rohen Nassschlacken (ab Austrag) liegen also im Schnitt tiefer als die Trockenschlacken, die Gehalte sind aber in der gleichen Größenordnung. (Anmerkung: Die Analysendaten der Rohschlacken stammen aus einem anderen Zeitraum als die der Restschlacken, das heißt, die Vergleichbarkeit mit den Restschlackendaten ist zunächst schlecht. Allerdings sind hier in dieser Betrachtung die Unterschiede zwischen Roh- und Restschlacken so groß, dass das Ausmaß zeitlicher Schwankungen in den NE-Metallgehalten der Rohschlacken kaum eine Rolle spielen kann.) Für die Korngrößenklasse 0-0,2 mm liegen von den Rohschlackenanalyse vom Nov. 2021 keine durchgängigen Daten für metallisches Aluminium vor, weil bei der Probenaufbereitung der Nassschlacken diese Kornfraktion ausgewaschen wurde. Auf Grund der größenordnungsmäßig gleichen Gehalte für das NE-Metall 0,2-1 mm bei den rohen Nass- und Trockenschlacken wird es als unwahrscheinlich angesehen, dass die große Differenz (ca. Faktor 10) zwischen aufbereiteten Nassschlacken und der Restschlacke der ZAV-Recycling AG im Körnungsbereich 0,2-1 mm auf die Rohschlackenzusammensetzungen zurückzuführen ist.

In den aufbereiteten Schlacken liegen die Gehalte an NE-Metall 0,2-1 mm (ZAR-Analyse) bei 0,013 % TS (Gebr. Lienhard AG), 0,015 % TS (DHZ AG) und 0,14 % TS (ZAV Recycling AG). Der Gehalt an NE-Metall 0,2-1 mm in der aufbereiteten Trockenschlacke ist also ca. 10-mal höher als in den aufbereiteten Nassschlacken. Betrachtet man Aluminium und NE-schwer getrennt, so fällt auf, dass der Unterschied zwischen aufbereiteter Nass- und Trockenschlacke beim Aluminium fast 20-fach ist, beim NE-schwer aber nur ca. 2,4-fach. Das heißt, der eklatante Unterschied zwischen aufbereiteten Nass- und Trockenschlacken im Gehalt NE-Metall 0,2-1 mm wird von der Differenz beim Aluminium verursacht. Betrachtet man die Abnahme der Gehalte zwischen rohen (also Werte Nov. 2021, wie oben angeführt) und aufbereiteten Schlacken, so ergibt sich bei der Trockenschlacke weniger als eine Halbierung der Gehalte, während bei den Nassschlacken die Werte auf ungefähr ein Achtel sinken. Wie weiter oben bereits beschrieben ist, sind die Restmetalle 0,2-1 mm bei den aufbereiteten Nassschlacken zudem deutlich ärmer an Aluminium (zugunsten von NE-schwer-Komponenten) als das Restmetall 0,2-1 mm der Trockenschlacke, das hauptsächlich aus Aluminium besteht. Es erscheint unwahrscheinlich, dass im Körnungsbereich 0,2-1 mm die Abreicherung auf ca. ein Achtel allein durch die Aufbereitung von Gebr. Lienhard AG und DHZ AG erreicht wurde. (Das entspricht einem Abscheidegrad von 85-90 %.) Noch unwahrscheinlicher ist es, dass das Aluminium 0-0,2 mm bei der Aufbereitung vollständig (Al met nicht nachweisbar in Restschlacke 0-0,2 mm von Gebr. Lienhard AG) bzw. beinahe vollständig (0,01 % TS Al met in Restschlacke 0-0,2 mm von DHZ AG) aus der Schlacke entfernt wurde. In der vergleichbaren Körnung aus der ZAV Recycling AG ("Triage-Staub" <0,2 mm) finden sich ca. 0,8 % metallisches Aluminium.



aS, mS...Rückstandsfraktionen aus der ZAR-Analyse: „aufbereitete Schlacke“ und „magnetische Schlacke“

\* bei den Daten von ZAV Recycling AG ist der Teil mS 0,2-1 mm im grauen Balken „Al met <1 mm aus ZAR-Rückstand >1 mm“ enthalten

Abb. 26: Vergleich der Gehalte an metallischem Aluminium <1 mm, aufgeschlüsselt.

In Abb. 26 sind sämtliche gemessenen Aluminiumanteile <1 mm nochmals zusammengestellt. Wie der Vergleich mit den NE-Metall-„Gesamtgehalten“ aus Abb. 25 zeigt, ist die Differenz zwischen aufbereiteten Nassschlacken und der aufbereiteten Trockenschlacke zum größten Teil dem Aluminium <1 mm zuzuschreiben, für beide Parameter, „Gesamtgehalte“ wie auch Gehalte Aluminium <1 mm ist die Differenz ungefähr 0,5 % TS. Wahrscheinlich ist, dass sich diese Differenz aus dem Verhalten von filigranem, brüchigem Aluminium erklärt. In der Hitze geschrumpfte Folien, oder umgeschmolzene, dünnwandige Verpackungen geben zum Teil dünne, filigrane Gebilde. Aluminium-Staub und dünne Teilchen mit Dicken im unteren Zehntel-mm-Bereich können in den Nassschlacken weitgehend korrodieren. Die im Schlackenprojekt in den Korrosionsversuchen festgestellten Korrosionsraten sprechen auch nicht gegen ein vollständiges Korrodieren solch feiner Aluminium-Teilchen beim Durchlaufen des Nassaustrags, gefolgt von Wochen oder Monaten der Zwischenlagerung der Schlacke. In der trocken ausgetragenen Schlacke bleiben Aluminiumstaub und dünnes Material dagegen erhalten. Größere brüchige Stücke und Gebilde von geringer Materialstärke können zudem beim Umladen der Schlacke oder in der Aufbereitung feines Aluminium <1 mm als Kornbruch nachliefern.

**Anmerkung:**

Die verschiedenen Gehalte feiner NE-Metalle und insbesondere feinen Aluminiums <1 mm in den primären Restschlacken sind im Kontext der gegenwärtigen Schlackenaufbereitung und Metallrückgewinnung von geringer Bedeutung, weil gemessen an den NE-Metallgehalten der rohen Schlacken die Körnung 0,2-1 mm nur einen Anteil von 3-5 % der NE-Metalle >0,2 mm ausmacht (siehe Rohschlackenanalysen, Schlackenprojekt). Die feinsten Anteile metallischen Aluminiums in der Schlackenfraktion 0-0,2 mm können als derzeit nicht rückgewinnbar gelten. Die Messergebnisse legen nahe, dass sehr feines Aluminium in den Nassschlacken durch Korrosion verloren geht, während es in der Trockenschlackenaufbereitung derzeit nur schlecht abgetrennt werden kann bzw. der Schlackenstaub 0-0,2 mm keiner Metallabscheidung zugeführt wird. Für die Restmetallgehalte heißt das, dass aufbereitete Trockenschlacken systematisch höhere Werte im Feinkornbereich (<1 mm) aufweisen, weil der Faktor Aluminium-Korrosion ausgeschlossen ist und aus dünnem, filigranem Aluminium durch Kornbruch neue Feianteile gebildet werden können. Eine Beurteilung von Restschlacken aus der primären Metallabscheidung über NE-Metall-Gesamtgehalte ist daher nicht

*aussagekräftig über die Leistungsfähigkeit einer Schlackenaufbereitungsanlage. Es ist nicht unterscheidbar, ob niedrige Gehalte im Feinkornbereich Aufbereitungserfolgen (inkl. geringem Kornbruch) oder Korrosionsverlusten zuzuordnen sind.*



## **5 Zitierte Quellen**

BAFU (Hrsg.) (2017): Analysenmethoden im Abfall- und Altlastenbereich. Stand 2017. Bundesamt für Umwelt. Bern. Umwelt Nr. 1715.

Gy, P. M. (1992): Sampling of Heterogeneous and Dynamic Material Systems. Elsevier. Amsterdam, New York.

ZAR (Hrsg.) (2014): Methodenband. Probenahme, Probenaufbereitung und Analyse fester Rückstände der thermischen Abfallbehandlung und deren Aufbereitungsprodukten. ZAR Zentrum für nachhaltige Abfall- und Ressourcennutzung. Hinwil.



## 6 Anhang

Tab. 20: Zusammenfassung wesentlicher Messergebnisse.

		Restschlacke Gebr. Lienhard AG Deponie Riet Winterthur	Restschlacke DHZ AG, Lufingen (Limeco Schlacke)	Restschlacke ZAV Recycling AG (über alle Restfraktionen)
<b>Originalanalysenwerte Labor Bachema ("NE" = NE + VA)</b>				
BAFU-Methode, "NE" 2-16 mm	[NE + VA % in TS <16 mm]	0,31	0,37	0,30
Bachema-Methode, "NE" 2-16 mm	[NE + VA % TS]	0,46	0,50	0,35
Bachema-Methode, "NE" >1 mm	[NE + VA % TS]	0,66	0,92	0,51
<b>Labor Bachema + Nachsortierung der Metalle (Aussortieren von VA)</b>				
BAFU-Methode, NE 2-16 mm	[NE % in TS <16 mm]	0,20	0,27	0,26
Bachema-Methode, NE 2-16 mm	[NE % TS]	0,29	0,34	0,25
<b>Verteilung auf Korngrößenklassen bei Bachema-Methode und Rest-Al met im Rückstand &lt;1 mm</b>				
Bachema-Methode, NE >16 mm	[NE % TS]	0,001	0,05	0
Bachema-Methode, NE 8-16 mm	[NE % TS]	0,07	0,03	0,02
Bachema-Methode, NE 2-8 mm	[NE % TS]	0,23	0,31	0,23
Bachema-Methode, NE 1-2 mm	[NE % TS]	0,09	0,17	0,14
<b>Bachema-Methode, NE &gt;1 mm</b>	<b>[NE % TS]</b>	<b>0,39</b>	<b>0,56</b>	<b>0,39</b>
Al met im Rückstand <1 mm von Bachema-Methode	[NE % TS]	0,27	0,34	0,64
<b>NE aus weiteren Schlackenfraktionen:</b>				
Al met in Schlackenstaub 0-0,2 mm	[NE % TS]			0,06
NE 0,2-1 mm in aufb. S. 0,2-1 mm (ZAR)	[NE % TS]			0,16
Al met im Rückst. aufb. S. 0,2-1 mm	[NE % TS]			0,15
<b>"Gesamtgehalt" NE-Metall</b>	<b>[NE % TS]</b>	<b>0,66</b>	<b>0,89</b>	<b>1,40</b>
(via Bachema-Methode + Nachsortierung + Rückstandsanalyse)				
<b>ZAR-Analyse + Rückstandsanalysen</b>				
<b>ZAR-Analyse (0,2-16 mm, abtrennbar mit Wirbelstromabscheider), Originalwert / Basis reines NE-Metall</b>				
NE 5-16 mm (ZAR)	[NE % TS]	0,12 / 0,07	0,20 / 0,14	0,08 / 0,06
NE 1-5 mm (ZAR)	[NE % TS]	0,18 / 0,09	0,33 / 0,22	0,31 / 0,26
NE 0,2-1 mm (ZAR)	[NE % TS]	0,03 / 0,01	0,05 / 0,01	0,16 / 0,14
<b>SUMME 0,2-16 mm (ZAR)</b>	<b>[NE % TS]</b>	<b>0,33 / 0,17</b>	<b>0,58 / 0,38</b>	<b>0,55 / 0,46</b>
<b>Rückstandsanalysen</b>				
im Rückstand >16 mm				
NE >16 mm (via Brechen, Sieben, Sortieren)	[NE % TS]	0,01	0,01	0
im Rückstand >1 mm:				
NE 1-16 mm im ZAR-Rückstand + NE 1-16 mm aus Schlacke >16 mm (via Bachema-Methode + Nachsort.)	[NE % TS]	0,23	0,20	0,27
Al met <1 mm	[NE % TS]	0,26	0,31	0,49
im Rückstand <1 mm:				
Al met in aufb. S. 0,2- 1 mm	[NE % TS]	0,01	0,004	0,15
Al met in magn. S. 0,2-1 mm	[NE % TS]	0,004	0,001	---
Al met in Staub 0-0,2 mm	[NE % TS]	0	0,001	0,06
Summe Al met <1 mm in allen Rückst.	[NE % TS]	0,27	0,31	0,70
<b>Summe NE in allen Rückst.</b>	<b>[NE % TS]</b>	<b>0,50</b>	<b>0,51</b>	<b>0,97</b>
<b>"Gesamtgehalt" NE-Metall</b>	<b>[NE % TS]</b>	<b>0,68</b>	<b>0,91</b>	<b>1,43</b>
(via ZAR-Analyse + Rückstandsanalysen)				