

Kurzbericht Modul 5

MetExSlag - Bestimmung des partikulären NE-Metallanteils in aufbereiteter KVA-Schlacke

Ausgangslage.....	2
Teilnehmer und Verfahren	4
Methode nach VVEA (Bachema AG)	4
Methode ZAR (Stiftung für nachhaltige Abfall- und Ressourcennutzung)	4
Methode SelFrag	5
Methode Australp Sarl	5
Methode Skutan.....	5
Herstellung der Referenzschlacke	6
Resultate	8
Zusammenfassung und Fazit	11
Anhang	13
Methode BAFU (Bachema).....	13
Methode ZAR	14
Methode selFrag)	15
Methode Australp	16
Methode Skutan.....	17

Ausgangslage

Im Rahmen der Studie MetExSlag hatte man sich geeinigt, dass die Restmetallgehalte primär nach der heute gültigen BAFU-Methode bestimmt werden sollen. Die Limitierung der Methode in Bezug auf die berücksichtigten Korngrößen der NE-Zielfraktion sowie der Änderung der Kornform und Korngrösse durch die Aufbereitung werden seit längerem diskutiert und kritisiert. Es wurde deshalb beschlossen, dass die Bestimmung der Restmetallgehalte von Restschlacken nach der BAFU-Methode mit Resultaten aus alternativen Methoden verglichen werden soll. Dazu wurde eine «Referenzprobe» hergestellt und an die Teilnehmer verteilt.

Gemäss der VVEA dürfen Schlacke aus Anlagen, in denen Siedlungsabfälle oder Abfälle vergleichbarer Zusammensetzung verbrannt werden, auf Deponien oder Kompartimenten des Typs D abgelagert werden, wenn:

a) in der Schlacke enthaltene partikuläre Nicht-Eisenmetalle (NE) vorgängig zurückgewonnen wurden, mindestens aber so weit, dass ihr Anteil in der Schlacke 1 Gewichtsprozent nicht überschreitet; für die Bestimmung des Gehalts an partikulären Nicht-Eisenmetallen wird die Schlacke auf eine Korngrösse von 2 mm gemahlen; und b) sie höchstens 20'000 mg TOC pro kg enthält.

Damit wird der Schadstoffeintrag in Deponien verringert und durch die Metallrückgewinnung werden wertvolle Ressourcen geschont.

NE-Restmetallbestimmung gemäss VVEA-Vollzugshilfe («BAFU-Methode»)

Die in der Vollzugshilfe «Messmethoden im Abfall- und Altlastenbereich» vorgegebene Methode zur Bestimmung des partikulären NE-Metallanteils in KVA-Schlacke erlaubt es mit vertretbarem Aufwand den Restmetallgehalt zu bestimmen. Die «BAFU-Methode» beruht auf dem Prinzip der selektiven Zerkleinerung. Mit der NE-Restmetallgehaltbestimmung werden die partikulären Metalle zwischen 2 und 16 mm bestimmt.

Probennahme und Probenvorbereitung	<ul style="list-style-type: none"> • Entnahme einer Teilprobenmenge von 150-200 kg • Teilung auf eine Probenmenge von ca. 35 kg • Siebung der Probe über ein 16 mm Sieb • Das Überkorn >16 mm wird nicht berücksichtigt und verworfen. • Trocknung der Probe <16 mm
Sortierung	<ul style="list-style-type: none"> • Selektive Zerkleinerung der Probe <16 mm. • Pulverisierung der spröden mineralischen Schlackenbestandteile durch mechanische Beanspruchung im Backenbrecher. Partikulären Metalle werden hingegen nur geringfügig verformt. • Stufenweise Absiebung der feinen mineralischen Schlacke und Aussortierung der partikulären Metalle bis die gesamte mineralische Schlacke <2 mm abgeschieden ist.
Quantifizierung	<ul style="list-style-type: none"> • Die Restmetalle werden im Korngrößenbereich 2-16 mm bestimmt. • Die prozentuale Angabe des NE-Restmetallgehalts basiert auf der gesamten Masse der getrockneten Schlacke <16 mm.

Limitierungen der «BAFU-Methode»

Die Bestimmung der Restmetallgehalte ist effizient, weist aber auch Schwachstellen auf, im Wesentlichen werden drei Punkte kritisiert:

- 1.) Die Art der Aufbereitung (Brechen/Mahlen) verändert die Form und Korngrößen der ursprünglich vorliegenden Metalle
- 2.) Die Ansprüche an die Bestimmung des partikulären NE-Metallanteils haben sich mit den neuen Aufbereitungsverfahren verändert, insbesondere die Limitierung auf 2-16mm
- 3.) Die Schlackenfraktion >16mm wird nicht in der Bilanz berücksichtigt

Mit der Einschränkung auf 2-16 mm werden nicht alle partikulären NE-Metalle in der Restschlacke erfasst, Metalle <2 mm werden vorgängig abgeseibt. Es ist bekannt, dass durch die starken Druck- und Scherbelastungen im Backenbrecher oder in der Mühle ein Teil der partikulären Metalle zerkleinert wird. Dies gilt vor allem für partikuläre Aluminiumteile. Ebenfalls nicht erfasst werden eingeschlossenen partikuläre Metalle in der Fraktion >16 mm.

Die Berechnung des partikulären NE-Metallanteils bezieht sich auf die Gesamtmasse der getrockneten Schlacke 0-16 mm, was zu einer systematischen Unterbestimmung von deponierten NE-Metalle führen kann.

Moderne Schlackenaufbereitungsanlagen brechen die Schlacken intensiv auf, so dass auch die in der mineralischen Schlacke >16 mm eingeschlossenen partikulären Metalle zurückgewonnen werden. Mit der heutigen Sortiertechnik ist es zudem möglich, partikuläre Metalle im Korngrößenbereich 0.2-2 mm mit einem hohem Wirkungsgrad zurückzugewinnen. Um den Gesamtgehalt an partikulären Metallen zu ermitteln, sollten die partikulären NE-Metalle in einem möglichst umfassenden Korngrössenspektrum bestimmt werden.

Es ist zudem bekannt, dass die Art und Durchführung der vorbereitenden Arbeiten und die händische Aussortierung der Metalle zu einer relativ grossen Bestimmungsunsicherheit führen.

Teilnehmer und Verfahren

Folgende Methoden wurden an der Testschlacke angewendet. Die Teilnehmer haben sich bereit erklärt ihre Methode im Rahmen der Studie zu teilen:

- Bachema (als BAFU Referenz-Methode; zusätzlich 1-2mm; im Auftrag)
- Kreislaufführung mit Wendelförderer (ZAR)
- Elektrodynamische Fragmentierung (selFrag)
- Mechanische Abtrennung & Aufschluss (Australp Sarl, P.A. Wülser)
- Nadelhammermethode (Ingenieurbüro S. Skutan)

Alle Methoden sollen folgende minimalen Angaben liefern:

- Anteil partikuläre NE-Metalle >2 mm (wenn möglich zusätzlich 1-2 mm)

Dies erlaubt einen Vergleich der Anteile der freigelegten Metalle aus den unterschiedlichen Verfahren (inkl. BAFU Methode).

Die Teilnehmer können weitere Trennschnitte bzw. Korngrössenbereiche definieren.

Vergleichs- und Bewertungskriterien

- Anteil an partikulären NE-Metallen >2 mm
- Anteile an partikulären NE-Metallen <2 mm
- Technische Machbarkeit (Komplexität der Bestimmung)

Folgende zusätzliche Angaben wären notwendig, um eine weitere Beurteilung der Methoden in Bezug auf ihre Eignung als Standardmethoden zu beurteilen:

- *Aufwand/Kosten/Kapazität für die Bestimmung*
(*Investitionen, Verbrauchsmat., Energie, Unterhalt*)

Die verfahrenstechnischen Ansätze der 5 Methoden unterscheiden sich z.T. stark:

Methode nach VVEA (Bachema AG)

Die Bachema führt die Restmetallbestimmung gemäss der Vollzugshilfe (Messmethoden im Abfall- und Altlastenbereich, Anhang 3, S.95-96) durch. Zusätzlich wurden auch die Metallfraktionen 1-2mm analog aufbereitet und bestimmt.

Methode ZAR (Stiftung für nachhaltige Abfall- und Ressourcennutzung)

Die Stiftung ZAR hat eine Anlage entwickelt, mit der auch grosse Mengen von Restschlacke (ab 50 kg bis mehrere 100 kg) automatisiert verarbeitet werden können. Verschiedene Korngrössenfraktionen werden im Kreislauf über einen Wendelförderer und NE-Abscheider prozessiert und anschliessend wird mit einem Induktionsteiler der mineralischen Anteil in den separierten NE-Metallen bestimmt. Damit werden der Restmetallgehalte in den Restschlacken und der Schlackengehalt der NE-Metalle an grossen Probenmengen zuverlässig bestimmt.

Methode SelFrag

Die elektrodynamische Fragmentierung ist ein Verfahren, bei dem die Materialien durch hochenergetische elektrische Entladungen im Wasserbad aufgetrennt werden. Die selFrag AG baut sowohl Labor- wie auch Industrieanlagen mit dieser Technologie. Für diese Studie wurden auf einer Laboranlage über mehrere Schritte unterschiedliche Korngrößenfraktionen prozessiert und die NE-Metalle abgetrennt.

Methode Australp Sarl

Die verwendete Methode ist eine Kombination von mechanischer und chemischer Aufbereitung und Messung. Die Proben wurden gesiebt und grosse Partikel (15-20 mm) manuell entfernt. Zur Entfernung von Schlacke und anderen anhaftenden nicht-metallischen Bestandteilen wurden die manuell sortierten metallischen Partikeln zerkleinert und/oder gereinigt. Dazu wurden sie in einer Backenmühle gebrochen, in einer Walzenmühle weiter aufbereitet, und durch sukzessives Sieben bei 10, 8, 5, 2 mm die Metalle auf jeder Stufe bis zur vollständigen Aufbereitung der Schlacke auf <2 mm entfernt.

Die zurückgewonnenen Metalle >2 mm werden gereinigt, getrocknet und gewogen. An einer Teilprobe von ca. 10 kg werden folgende Schritte durchgeführt:

- A) Alkalische Wäsche mit 10M NaOH bei L/S=1 auf eine 500g Teilprobe mit Sandmahlgut bei <1mm, Auslaugzeit von 48h, gefolgt von der Bestimmung über die H₂-Gasbildung und der Berechnung des Gehalts an metallischem Aluminium (+Zink & Magnesium metallisch).
- B) Gravimetrische Sortierung von Sanden < 1mm mittels Rütteltisch/Panning und Herstellung eines NE-Schwermetallkonzentrats mit einer Dichte >6.0 mit nachfolgender Trocknung und Gewichtsbestimmung.

Die Auswertung wurde als Doppelbestimmung durchgeführt.

Methode Skutan

Die sog. «Nadelhammermethode» wurde von S. Skutan in Zusammenarbeit mit der Stiftung ZAR erarbeitet. Durch eine sehr aufwendige aber schonende Zerkleinerung des mineralischen Anteils mit einem Nadelhammer werden auch sehr feine Metalle freigelegt. Damit werden auch metallische Partikel erfasst, welche in kleinen Schlackenagglomeraten eingeschlossen sind. Damit dürfte die Methode sehr nahe an den maximal abtrennbaren «Metallgehalt» kommen, welcher mit mechanischen Methoden abtrennbar ist. Die Al-Gehalte wurden über die H₂-Bildung bestimmt.

Herstellung der Referenzschlacke

Die Versuchsschlacke wurde aus 30% trocken ausgetragenen und 70% nass ausgetragenen Restschlacken hergestellt.

Tab 1: Mischungsverhältnisse und Mengen der verwendeten Fraktionen der nass und trocken aufbereiteten Restschlacken für die Testmischung

Mischverhältnis

Anlage	Anteil
Nassschlacke	30%
Trockenschlacke	70%

Nassschlacke aufbereitet

Fraktion	Anteil	Anteil in Mischung
Feinschlacke <4 mm	46%	14%
Grobschlacke >4 mm	54%	16%
Total	100%	30%

Trockenschlacke aufbereitet

Fraktion	Anteil	Anteil in Mischung
Staub	21%	15%
Feinschlacke	24%	17%
Grobschlacke	25%	18%
Magn. Schlacke	30%	21%
Total	100%	70%

Fraktion	Typ	Anteil (%)	Anteil (kg)
Feinschlacke <4 mm	nass	14%	151.8
Grobschlacke >4 mm	nass	16%	178.2
Staub	trocken	15%	161.7
Feinschlacke	trocken	17%	184.8
Grobschlacke	trocken	18%	192.5
Magn. Schlacke	trocken	21%	231.0
Summe		100%	1100

Die Fraktionen wurden im Juni 2021 bei der Spross AG in Zürich aufbereitet. Die 4 Fraktionen der trocken aufbereiteten Schlacke wurden von der ZAV RE Hinwil angeliefert und die 2 Fraktionen der nass aufbereiteten Schlacken wurden von der Anlage in Tambrig geliefert. Die Anteile der Fraktionen wurden ohne Korrektur des Wassergehaltes eingewogen und gemischt. Der Wassergehalt wurde erst nach der Mischung und Teilung bestimmt.

Die Schlacken wurden intensiv mit einem kleinen Schaufellader durch die Spross AG mehrmals gemischt und auf einer Betonunterlage verteilt. Alle weiteren Teilungsschritte wurden über Riffelteiler nach dem Schema gem. Abb.1 durchgeführt.

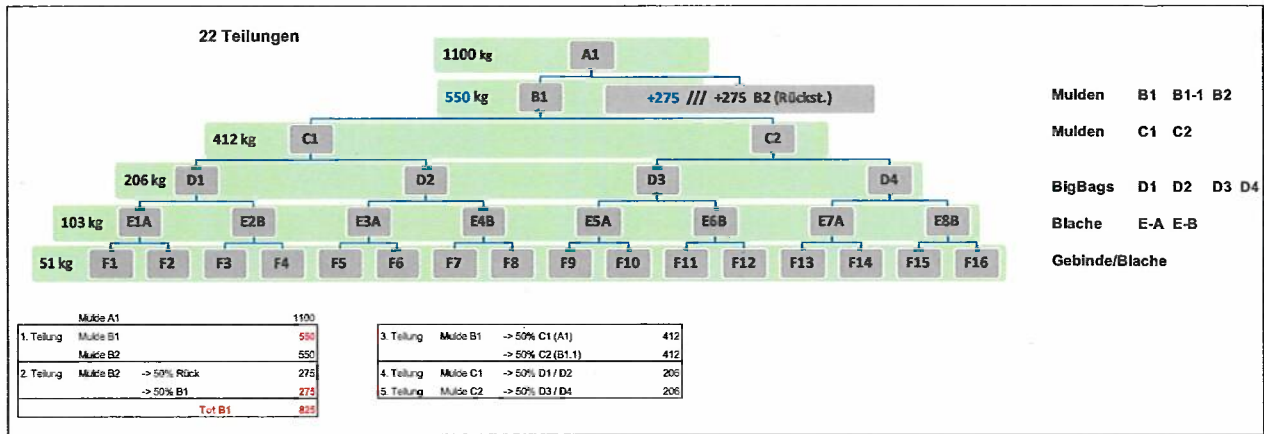


Abb. 1: Schematische Darstellung der Probenreduktion für die Herstellung der 16 Teilproben mit ca. 51kg. Diese Teilproben wurden entsprechend den Vorgaben der Teilnehmer z.T. weiter mittels Riffelteiler geteilt

Die Teilproben (F1...F16) wurden entsprechen der folgenden Tabelle an die Teilnehmer verschickt.

Tab. 2: Die hergestellten Teilproben mit Angaben zum Gewicht (kg), den Abnehmern sowie dem Verlust durch die Aufbereitung (und Wasserverlust)

Probe	Gew. A kg	Gew. B kg	Gew. Tot kg	Abgabe an
F1	52.0		52.0	ZAR
F2	51.2		51.2	Selfrag
F3	49.4		49.4	Rückstellung
F4	24.4	24.3	48.7	Bachema
F5	50.4		50.4	ZAR
F6	51.6		51.6	UniBE
F7	24.8	25.2	50.0	Australp SARL
F8	51.8		51.8	UniBE
F9	26.0	25.6	51.6	Bachema (A)
F10	52.0		52.0	ZAR
F11	51.2		51.2	UniBE
F12	51.8		51.8	Rückstellung
F13	52.0		52.0	ZAR
F14	26.4	26.2	52.6	Skutan
F15	25.6	25.1	50.7	Bachema
F16	54.6		54.6	Selfrag
B2	275.0		275.0	Rückstellung

Auswaage kg	1096.6
Einwaage kg	1101.0
Verlust kg	4.4
Verlust in %	0.40

Resultate

Die erhaltenen Resultate sind nur für die Fraktion 2-16mm bei allen 5 Methoden direkt vergleichbar, die der Fraktion 1-2mm sind bei 4 Methoden (ohne Australp) direkt vergleichbar. Unterhalb von 1 mm gibt es keine Methoden mit identischen Korngrössenschnitten, z.T. wurden nachträglich Kornverteilungskurven bestimmt.

In der Tabelle 3 sind die Anteile der NE-Restmetallbestimmung für die von den Methoden initial bestimmten Korngrössenklassen zusammenfassend dargestellt. Bei der Bachema AG wurden entsprechend dem Untersuchungskonzept 3 Proben als Referenzproben untersucht, bei denen aber eine Probe eine sehr grosse Abweichung zeigte. Die stark abweichende Messung zeigte einen NE-Gehalt (2-16mm) von 0.14% die beiden anderen Proben ca. 0.38%. Deshalb wurden 2 weitere Proben aufbereitet und es zeigte sich, dass die Probe mit dem geringsten Gehalt ein Ausreisser bzw. eine nicht konform aufbereitete Probe darstellt. In den folgenden Darstellungen erscheinen deshalb zwei Auswertungen für die Referenzprobe. Bei Bachema(5) wurde der Ausreisser einbezogen und bei Bachema(4) wurden nur die 4 Resultate der Proben ohne Ausreisser verwendet.

Tab. 3: Restmetallgehalte in gew.% der Korngrössenklassen der einzelnen Verfahren

KG Klasse	Bachema (5)	Bachema (4)	ZAR	selFrag	Australp	Skutan
2-16	0.328	0.375	0.606	0.560	0.496	0.494
1-2	0.184	0.184	0.104	0.140		0.213
0.4-1.0				0.240		
0.5-1.0						0.167
0.2-0.5						0.142
0-0.2						0.130
0.2-1.0			0.120			
0-2.0					0.340	
Total	0.512	0.559	0.830	0.940	0.836	1.146

chemisch bestimmt

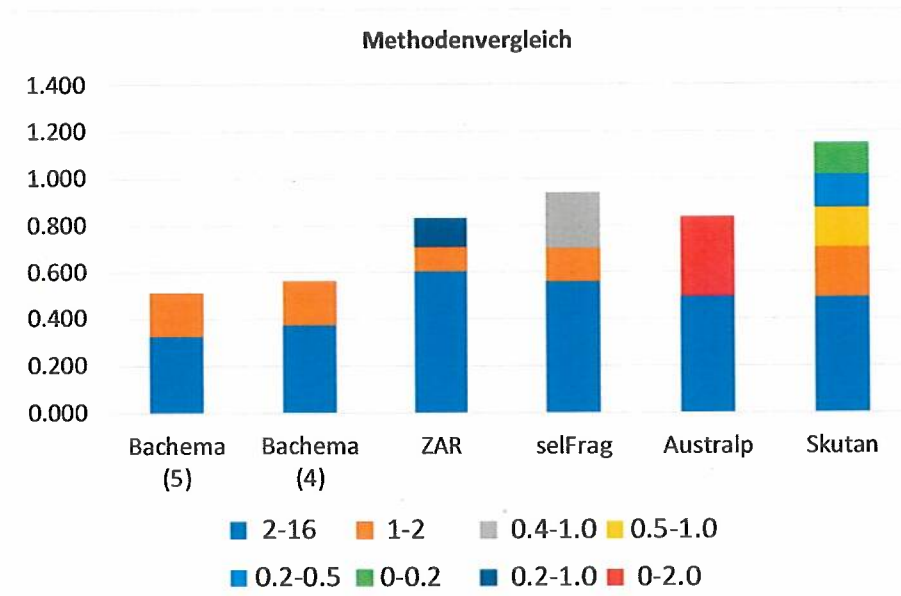


Abb. 2: Restmetallgehalte nach Korngrössenklassen der einzelnen Methoden

NE-Gehalte in der Fraktion 2-16 mm

In der graphischen Darstellung der gemessenen Anteile der Restmetallfraktionen (Abb. 2) wird ersichtlich, dass die bestimmten Anteile in der Fraktion 2-16mm mit der BAFU Methode deutlich unterschätzt werden. Die beiden Methoden, welche den grössten Anteil von NE-Metallen abtrennen (ZAR und selFrag) trennen knapp 50% mehr NE-Metalle ab. Die beiden anderen Methoden (Australp und Skutan) trennen ca. 32% mehr Metalle ab.

NE-Gehalte in der Fraktion 1-16 mm

Die Anteile der Fraktionen 1-2mm zeigen vergleichsweise geringe Unterschiede zwischen beiden Proben der Bachema (0.18%) und der Probe Skutan (0.20%) sowie der Probe von selFrag (0.14%). Die ZAR Methode bestimmt hier den geringsten Anteil mit 0.10%. Es wird angenommen, dass durch die schonende Aufbereitung der Anteil in der >2mm Fraktion bei ZAR in der Folge höher ist.

Für die Fraktion 1-16mm ergibt dies in der Folge eine geringere prozentuale Mehrbestimmungen als bei der Fraktion 2-16mm in Bezug auf die erweiterte BAFU Methode der Bachema: Australp +2%, ZAR +17%, selFrag +26% und Skutan +27%.

NE-Gehalte und Korngrößenverteilung 0-16 mm

Die Anteile <1mm, welche durch die erweiterte BAFU Methode nicht bestimmt werden, können herangezogen werden um das Potential in den feinen Fraktionen abzuschätzen. Hier zeigen sich grosse Unterschiede: von 0.17 % (ZAR), 0.24% (selFrag), 0.27% (Australp) bis zu 0.44% (Skutan).

An den Werten der Skutan Methode sieht man, dass ca. 38% der NE-Metalle noch in der Fraktion <1mm liegen (0-16mm = 1.15% bei <1mm = 0.44%).

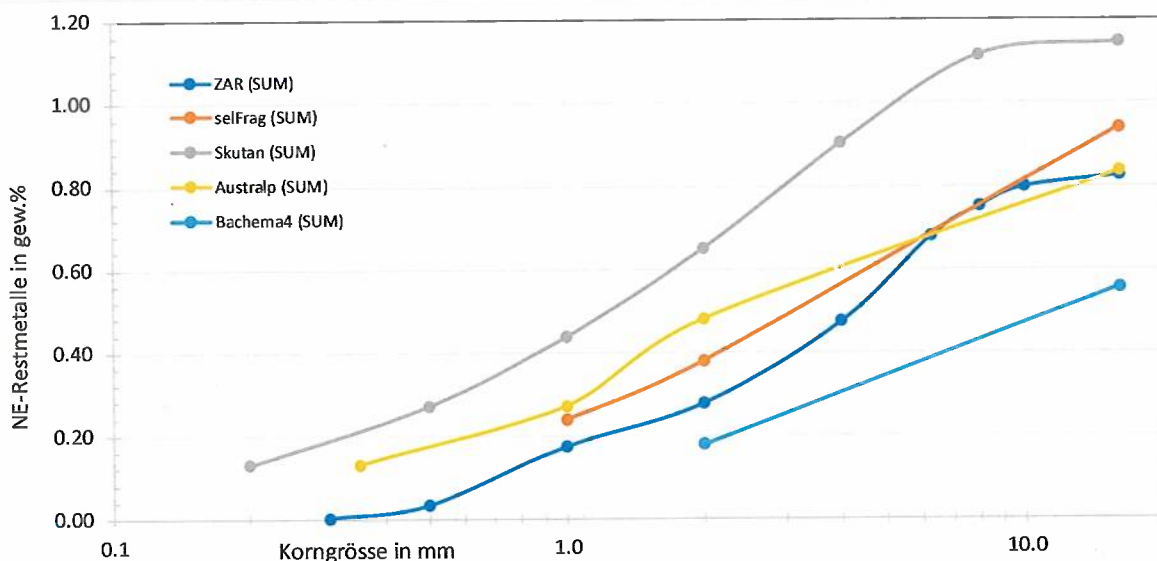


Abb. 3: Summenkurve der Korngrößen der untersuchten Bestimmungsmethoden.

Die Summenkurven zeigen, dass die Skutan Methode bereits in den feinen Korngrößen bis 0.2mm deutlich mehr Restmetalle bestimmt und hier die grösste Differenz zur ZAR Methode entsteht. Aber auch Australp bestimmt bis 0.35mm praktisch dieselbe Menge - allerdings wird bei beide Methoden in diesen Fraktionen ausschliesslich das metallische Al gemessen, welches durch die anderen Methoden nicht bestimmt wird. An den Resultaten der ZAR Methode wird deutlich, dass bei einer rein physikalischen

Aufbereitung bei den sehr feinen Korngrößen nur geringe Anteile der NE-Metalle abgetrennt werden, bei KG <0.3mm sind es lediglich 0.04%.

Mit der Methode Australp werden in den Korngrößen <2mm die NE-schwer Metalle weiter unterteilt (1-2, 0.35-1, <0.35 mm), Aluminium hingegen wird als Summe der <2mm Fraktion ausgewiesen. Ein direkter Vergleich ist deshalb nicht sinnvoll. In der Darstellung der Korngrößen-Summenkurven (Abb. 3 und 4) wurde deshalb für die Australp Probe Aluminium <2mm im Verhältnis der NE-schwer Metalle zu den Fraktionen verrechnet.

Setzt man für den Vergleich als «Startpunkt» der Abtrennung den Schnitt bei 1mm dann fallen die Unterschiede entsprechend geringer aus (Fig. 3). Die Australp- und die Bachema-Methode bestimmen für den Bereich 1-16mm praktisch identische Gehalte von ca. 0.56 gew.%, die selFrag- und die Skutan-Methode zeigen etwas höhere, aber auch sehr ähnliche Gehalte mit ca. 0.70 gew.% und die ZAR Methode ermittelt 0.65 gew.%.

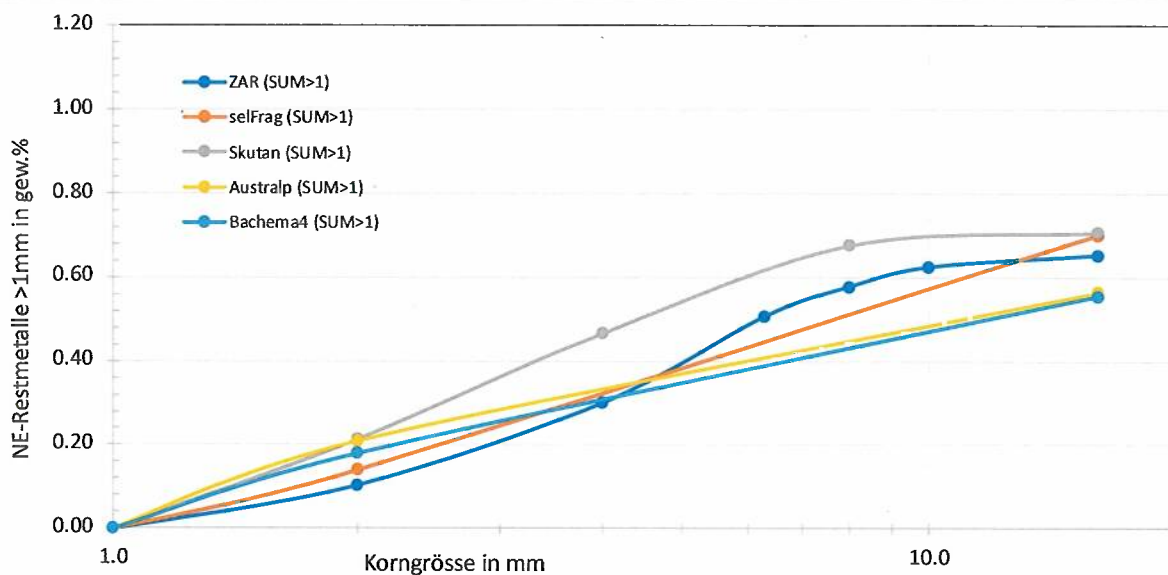


Abb. 3: Summenkurven der NE-Metallfraktionen grösser 1mm

Die Originalberichte aller Teilnehmer befinden sich im Anhang.

Zusammenfassung und Fazit

- Die bestimmten Anteile in der **Fraktion 2-16mm** werden mit der BAFU Methode deutlich unterschätzt. Die ZAR- und die selFrag-Methode bestimmen knapp 50% höhere NE-Anteile, die beiden anderen Methoden (Australp und Skutan) trennen ca. 32% mehr Metalle ab.
- Die Differenzen der bestimmten Anteile in der **Fraktion 1-16mm** in Bezug zur erweiterten BAFU Methode sind geringer und liegen zwischen +2% und +27%.
- Die Methode mit der höchsten Rückgewinnung (Skutan) zeigt, dass ca. 38% von metallischen Partikeln in der Fraktion <1mm liegt und mehr als die Hälfte (57%) in der Fraktion <2mm. Dies zeigt auf, dass hier noch ein mögliches Verbesserungspotential liegt.
- Die Mehrfachbestimmung der **Referenzmethode** (BAFU) hat gezeigt, dass wegen dem hohen Anteil an händischer Aufbereitung, bei tiefen NE-Gehalten (ca. 0.5 gew.%) Ausreisser vorkommen. Doppelbestimmungen mit definierten Abweichungen oder die Beurteilung der Messungen im Rahmen von Zeitreihen (Monitoring) könnten diese Fehlerquelle minimieren. Die Wiederholbarkeit der BAFU Methode ist nach der Streichung des Ausreissers aber gut. Bei 1-16mm beträgt die Standardabweichung 0.058 bei einem Mittelwert von 0.375, bei der Fraktion 1-2mm liegt die Standardabweichung bei 0.022 bei einem Mittelwert von 0.180.
- Die Methode **Skutan** ist die genaueste Methode um die in den Restschlacken vorliegenden Metallpartikel zu bestimmen. Die Methode zeigt tiefere Gehalte in den gröber körnigen Fraktionen im Vergleich zu den anderen mechanischen Methoden, welche diese Fraktionen eher überschätzen. Die schonende Behandlung, die bessere Abtrennung von nicht-metallischen Anhaftungen und das aufbrechen von agglomerierten Körnern durch die Nadelhammermethode führen zu einer Verschiebung zu höheren Gehalten bei kleineren Korngrößen. Die Methode ist wissenschaftlich sehr interessant und dürfte dem maximalen NE-Rückgewinnungspotential, welches durch mechanische Methoden möglich ist, am nächsten kommen. Die Methode dürfte aber einen zu hohen zeitlichen Aufwand erfordern um als «Standardmethode» eingesetzt zu werden.
- Die **selFrag** Methode bestimmt ebenfalls deutlich höhere NE-Gehalte als die BAFU Methode, aber auch hier dürfte der Aufwand, wie er in dieser Studie betrieben wurde zu hoch sein, um als Standardmethode eingesetzt zu werden. Ob die Methode auch mit geringerem Aufwand eingesetzt werden kann, wurde hier nicht abgeklärt.
- Die **Australp** Methode ist eine gute Methode um die Aluminium-Anteile und das chemische Inventar in der Fraktion <2mm genau zu bestimmen. Als Standardmethode dürfte aber auch diese Methode eher zu aufwendig sein.
- Die **ZAR** Methode zeichnet sich wahrscheinlich durch die beste Wiederholbarkeit auf Grund des geringsten Anteils an händischer Aufbereitung aus. Die Methode ist weitgehend automatisiert und es können grössere Probenmengen prozessiert werden, was die Bestimmungsunsicherheit zusätzlich senkt. Die Kreislaufführung führt zu einer sehr guten Abtrennung der NE-Metalle. Der Aufwand wurde nicht konkret ausgewiesen, aber durch eine weitgehende Automatisierung ist diese Methode als Standardverfahren denkbar.

- ⇒ Alle untersuchten Methoden sind in der Lage eine Erweiterung des Korngrössenspektrums der Restmetallbestimmungsmethode ab >1mm zu bestimmen. Die Unterschiede der bestimmten Metallgehalte der Methoden sind für den Korngrössenbereich 1-16mm geringer als bei 2-16mm.
- ⇒ Wenn man zusätzlich Korngrössen < 1mm bestimmen will, wird dies händisch kaum mehr effizient durchführbar sein und es drängt sich ein automatisiertes Verfahren wie z.B. die ZAR-Methode auf.

Es wurde im Rahmen dieser Studie keine Recherche durchgeführt, ob im In- oder Ausland andere Methoden zur Restmetallbestimmung existieren.