



Projektbericht

MetExSlag

Vergleich von verschiedenen Aufbereitungsverfahren
für KVA-Schlacken

Urs Eggenberger

Fachstelle für Sekundärrohstoffe

Institut für Geologie, Baltzerstrasse 1+3, 3012 Bern

Bern, Nov. 2023

Im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU)

Sur mandat de l'Office fédéral de l'environnement (OFEV)

Su mandato dell'Ufficio federale dell'ambiente (UFAM)

Commissioned by the Federal Office for the Environment (FOEN)

Projektbericht

MetExSlag - Vergleich von verschiedenen Aufbereitungsverfahren für KVA-Schlacken

Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Studie wurden 4 moderne Metallrückgewinnungsanlagen für KVA Schlacken auf ihre Effizienz untersucht. Die gewählte Probenmenge von je ca. 100 Tonnen NE-Metalle erlaubt robuste Aussagen über die Qualität der Metalle und der Restschlacken. Die Auswertung zeigte, dass alle Anlagen die NE-Metalle sehr effizient rückgewinnen und die heutigen Anforderungen an die NE-Restmetallgehalte einhalten und z.T. deutlich übertreffen.

Generell hat die Studie gezeigt, dass Verfahren sehr effizient arbeiten, wenn sie eine optimierte mechanische Aufbereitung (nass oder trocken) betreiben. Eine weniger selektiv eingestellte Q1-Metallabscheidung erhöht zudem die Gewinnung der feinkörnigen Metallfraktionen (<2mm), was mit höheren Anteilen an schlackenähnlichen Anhaftungen verbunden ist.

Die NE-Anteile der rückgewonnen Metallfraktionen der 4 Anlagen zeigen grosse Unterschiede zwischen 48 bis 81 bis Gew. %. Bei der folgenden Veredelung fallen entsprechend unterschiedliche Anteile an Schlackenstaub an. In Bezug auf die Trockensubstanz der Restschlacken werden 2.2-3.8 Gew. % NE-Metalle zurückgewonnen. Die Anlagen zeigen z.T. deutliche Unterschiede in der Effizienz der Rückgewinnung der Metalle, wobei die Performance für Aluminium, Kupfer Zink und Blei bei den Anlagen unterschiedlich ist.

Betrachtet man das Potential an Metallen in den Inputschlacken in Bezug zum chemischen Inventar der abgelagerten Restschlacken verbleiben aber noch immer in etwa dieselbe Menge als Summe von Al, Cu, Zn und Pb in den Schlacken zurück. Dies bedeutet aber nicht, dass diese Metalle vollständig mit mechanischen Verfahren zurückgewonnen werden könnten. Die verbleibende metallischen Partikel können sehr klein und eingeschlossen sein und zusätzlich in nicht-metallischer Form in kristallinen Phasen oder Gläsern eingebunden sein. Obwohl das Schadstoffpotential an diesen Metallen hoch ist, wird die Freisetzung bei den Eluattests durch das Karbonatsystem limitiert (Anhang B).

Beim Vergleich ist zu berücksichtigen, dass die Zusammensetzungen der Input-Schlacken regionale Unterschiede aufweisen, was auch für die Verteilung der enthaltenen Metalle Cu, Zn und Blei in den metallischen Anteilen der Schlacken zutrifft. Teilweise werden aus den Rohschlacken bereits bei den KVAs wesentliche Metallanteile entnommen, welche dann bei der Rückgewinnung auf den hier untersuchten Anlagen nicht mehr zur Verfügung stehen.

Inhaltsverzeichnis

1. Ausgangslage und Ziel des Projekts	3
2. Probenahmekonzepte	4
2.1. Probenahmekonzept für die Stoffströme inkl. Q1-Metalle	5
2.2. Aufbereitungskonzept für Q2	6
2.3. Abnahmebedingungen und Abgeltung der Q2 Fraktionen	7
3. Durchführung der Probenahmen und der Veredelung	8
3.1. Durchführung der Probenahmen Q1:	8
3.2. Durchführung der Veredelung auf der supersort ^{metall} bei der DHZ	8
3.3. Massenbilanz Q1	9
3.4. Massenbilanz Q2	9
4. Resultate	10
4.1. Massenbilanz	10
4.2. Metallrückgewinnung Q1	10
4.3. Restmetallgehalte der R1-Schlacken	11
4.4. Veredelung Q2 und Metallqualität	12
4.5. Fehlerabschätzung und Fehlerfortpflanzung	16
4.6. Metallrückgewinnung	17
4.7. Chemisch bestimmte Metallverluste der Restschlacken	17
4.8. Effizienz der Metallabscheidung	19
5. Fazit und Diskussion	21
6. Anhang A . Konzepte und Bilanzen	23
6.1. Probenahmekonzept Anlage A	24
6.2. Probenahmekonzept Anlage B	26
6.3. Probenahmekonzept Anlage C	29
6.4. Probenahmekonzept Anlage D	31
6.5. Probenahme Q2 und Analytikprogramm	33
6.6. Massenbilanzen Q1	38
6.7. Restmetallbestimmung	40
6.8. Massenbilanzen Q2	41
7. Anhang B - Eluatverhalten Restschlacken	43
7.1 Einführung	44
7.2. Resultate und Diskussion	45
VVEA Tests	45
Säulentests	47
Einfluss der R2-Stäube auf die Freisetzung	50
7.3. Analysen	51
Batchversuche VVEA	51
Säulenversuche	52
8. Referenzen	53
9. Impressum	54

1. Ausgangslage und Ziel des Projekts

Die KVA-Schlackenaufbereitung und die Metallrückgewinnung sind in der Schweiz auf einem hohen Niveau. Verschiedene Technologien tragen dazu bei. In nächster Zeit stehen bei einigen KVAs Entscheidungen zum Schlackenaustrag (nass oder trocken) und der damit verbundenen Schlackenaufbereitung an. Daher wurde im Auftrag des BAFU ein Vergleich der verschiedenen Aufbereitungstechnologien für die Entscheidungsträger, Anlagenbetreiber und Vertretungen der kantonalen Umweltämter erarbeitet.

In den letzten Jahren wurden von den Anlagenbetreibern und der Wissenschaft viel Wissen zu den KVA-Schlacken erarbeitet. Die Ergebnisse des vorliegenden Technologievergleichs können als Grundlage für eine allfällige Anpassung, des in der VVEA beschriebenen NE-Restmetallgehaltwertes und dessen Analysenmethode genutzt werden. Es ist nicht die Absicht des Projektes den SDT neu zu definieren. Es wird keine Bewertung (Ranking) der verschiedenen Technologien vorgenommen, sondern die betrieblichen Resultate der einzelnen Anlagen werden zusammen mit den jeweiligen Rahmenbedingungen diskutiert. Der Vergleich beschränkt sich ausschliesslich auf:

- die Metallrückgewinnung
- die resultierende Metallqualität
- die Qualität der verbleibenden Restschlacke und die Restmetallbestimmung

Es wird kein Vergleich ökonomischer Daten der Anlagen erfolgen und es werden auch keine Ökobilanzen im Rahmen dieses Projekts erstellt.

Projektorganisation

Projektgruppe

Die Projektgruppe setzt sich aus den vier Anlagenbetreibern, zwei Experten, den Projektorganisatoren und den Projektverantwortlichen zusammen (Details siehe Projektbeschreibung).

Begleitgruppe

Die Begleitgruppe setzte sich aus Vertretern der Kantone, dem VBSA und zwei KVA-Betreibern zusammen: Daniel Chambaz (GE), Thierry Pralong (VS), Gertrud Engelhardt (BS), Leo Morf (ZH), David Schönbächler (AG), Oliver Steiner (BE) und Dominic Utinger (BL); Robin Quartier (VBSA) und Ruedi Kummer (Renergia).

2. Probenahmekonzepte

Es wurden verschiedene Probenahme- und Untersuchungskonzepte diskutiert.

Das von der Projektleitung vorgeschlagene Konzept, jeweils ca. 100 Tonnen NE-Metalle bei einem Metallabnehmer im Ausland einzeln einzuschmelzen, um die Rückgewinnung und die Erträge zu bestimmen, wurde von allen vier Anlagenbetreibern und dem BAFU abgelehnt.

Anschliessend wurden im Wesentlichen zwei Ansätze diskutiert:

- Man beprobt die NE-Metallfraktionen ab Schlackenaufbereitungsanlage (Q1) über Stichproben und analysiert diese im Labor entweder individuell oder als Mischproben oder
- man verarbeitet eine grosse, repräsentative Menge von Q1 Metallen (ca. 100 Tonnen) auf einer industriellen Anlage und analysiert dann die veredelten Metalle (Q2) und deren Schlackenanteile. Der ursprüngliche Vorschlag die ca. 100 Tonnen direkt an die Metallverwerter zu liefern, einzeln aufzubereiten und über den Schmelzertrag zu bewerten, wurde von der Projektgruppe einstimmig abgelehnt.

Man einigte sich darauf, dass jeweils eine grosse Probenmenge (ca. 100 Tonnen pro Anlage) gesammelt und über die Anlage der DHZ veredelt und beprobt werden.

Die zu deponierenden Restschlacken (R1 und R2) und mögliche andere Stoffströme werden ebenfalls beprobt und analysiert.

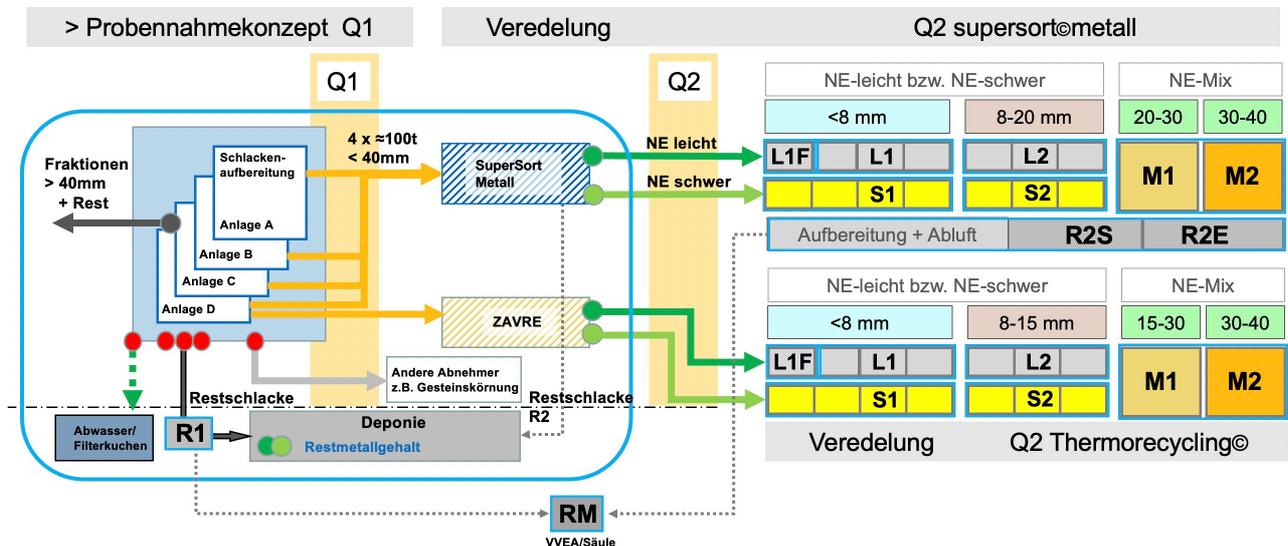


Abb. 2.1: Schematische Darstellung der Stoffströme und des Probenahmekonzepts.

2.1. Probenahmekonzept für die Stoffströme inkl. Q1-Metalle

Die Dauer der Probenahmekampagnen auf den 4 Anlagen werden über die Menge der Q1 Metalle (ca. 100 Tonnen) definiert und dauerten von ca. 7 Tagen bis 9 Wochen.

Die Anlagen werden im normalen Betrieb beprobt.

Alle Outputströme (Q1 und Q2) werden gewogen und mittels Stichproben beprobt. Anzahl und Probenmengen bzw. die Probenteilung werden fraktionsabhängig und für alle Anlagen individuell definiert. Dazu wurden individuelle Probenahmekonzepte erstellt (Anhang A).

Die Materialströme wurden für jede Anlage identifiziert und es wurden individuelle Probenahmepläne erstellt und mit dem Experten der Begleitgruppe besprochen.

Es wurden folgende Fraktionen ermittelt:

	Saidef	Elbis	DHZ	ZAV RE	
Output Wertstoffe	NE-Mischfraktion >40 mm NE-Mischfraktion 2-10 mm NE-Mischfraktion 10-40 mm	NE-Mischfraktion <5 mm NE-Mischfraktion 5-40 mm	NE-Mischfraktion <3 mm NE-Mischfraktion 3-10 mm NE-Mischfraktion 10-40 mm NE-Mischfraktion >40 mm	NE-Mischfraktion 0.2-15 mm NE-Mischfraktion 15-30 mm	} Q1 Fraktionen <40mm zur Veredelung
	Fe-Schrott >40 mm Fe-Schrott 10-40 mm Fe-Schrott 2-10 mm	NE-Mischfraktion aus Handsortierung 40-200 mm	Fe-Schrott (alle Fraktionen)	NE-Mischfraktion 30-80 mm (I401) NE-Mischfraktion >80 mm	
		Fraktion Chromstahl aus Kreislauf <40 mm Fraktion Batterien	VA-Stahl >40 mm Kupferspulen/Motoren	Fe-Schrott grob Fe-Schrott 0.2-15 mm Fe-Schrott fein VA-Stahl 15-80 mm VA-Stahl >80 mm Kupfer-Wicklungen >80 mm	
	Glas, Keramik			Glas 12-30 mm	
	Restschlacken	Restschlacke <2mm (nass/trocken) Restschlacke 2-10 mm Restschlacke 10-40 mm (Restschlacke > 40 mm)	Restschlacke <5 mm	Restschlacke <40 mm	Schlackenstaub <0.2 mm Aufbereitete Schlacke 0.3-2 mm Aufbereitete Schlacke 2-15 mm Magnetische Schlacke 0.3-15 mm

Abb. 2.2: Übersicht der Materialströme Q1 der 4 Anlagen.

Wo möglich wird auch die Masse der Input-Rohschlacken als Kontrollgrösse erfasst.

Die Restmetallbestimmung der Restschlacken wird gemäss BAFU-Methode im Korngrößenbereich 2-16 mm durch die Bachema AG durchgeführt.

Es werden alle Restschlackenfraktionen beprobt und chemisch analysiert. Das Eluatverhalten der Restschlacken wird in einem separaten Kapitel/Bericht behandelt und nicht weiter interpretiert.

2.2. Aufbereitungskonzept für Q2

Es werden alle Q1-NE-Mischfraktionen <40 mm der 4 Anlagen durch die supersort^{metall} der DHZ Oberglatt prozessiert. Damit wurden für alle Anlagen vergleichbare, marktfähige Q2-Qualitäten generiert. Die ca. 100 Tonnen Q1-NE-Fraktionen entsprechen ungefähr einer Tagesproduktion auf der supersort-Anlage.

Dies erlaubt einen robusten Vergleich der NE-Fraktionen:

- Der Schlackenanteil R2 welcher bei der Aufbereitung der NE-Fraktionen anfällt wird repräsentativ bestimmt und wird der Restschlacke R1 zugerechnet.
- Es werden homogene, vergleichbare Fraktionen und Mengen produziert:
 - Bestmögliche Repräsentativität
 - Bestmögliche Statistik
 - Reale und vergleichbare Rückgewinnungsraten
- Es ist eine Schweizer Lösung, was von der Projektgruppe verlangt wurde.

Der Aufwand ist höher als wenn nur eine Q1 Analyse durchgeführt würde, da sich die Probenahmehandlung deutlich verlängern und grosse Mengen umgeschlagen werden, das Vorgehen bietet aber einige Vorteile:

- Homogenisieren/Splitten/Schmelzen von Q1-Teilproben entfällt, und
- eine aufwändige (und unpräzise) Bestimmung der mineralischen Anteile der NE-Fraktionen Q1 im Labor entfällt.

Das Probenahmekonzept wurde in Absprache mit den Teilnehmern erstellt und beinhaltet im Wesentlichen folgende Grössen für die Fraktionen Q2:

- Inputmenge 100%
- Menge aller Aluminiumfraktion inkl. % Angabe
- Menge aller NE-Schwerfraktion inkl. % Angabe
- Menge der Fraktion >40mm
- Menge Restschlacke (Sichter + Entstauber)

Die Restschlacke R2, bestehend aus den 2 Fraktionen Sichter und Entstauber, aus der supersort^{metall} wird gemäss BAFU-Methode untersucht und zur R1-Restschlacke gerechnet.

Die ZAV Recycling AG beprobt zeitgleich ihren eigenen Veredelungsprozess unter Normalbedingungen, wobei die Massenströme und die Analytik durch die Uni Bern begleitet werden (inkl. Probennahme etc.).

Von allen Q1-Metallen werden bei der Annahme zur Veredelung Rückstellproben erstellt.

Die NE-Mischfraktionen Q1 aller Anlagen wurden als Input-Referenz im Labor der DHZ standardmässig entnommen und rückgestellt.

Die Erkenntnisse und Daten aus den supersort^{metall} Versuchen können nach vorgängiger Freigabe durch die DHZ publiziert werden. Dasselbe gilt für die ZAVRE für die Resultate des internen Versuchs.

Die Details sind im Anhang 6.5. «Probenahme Q2 und Analytikprogramm» beschrieben.

2.3. Abnahmebedingungen und Abgeltung der Q2 Fraktionen

Die Q1-NE-Mischfraktionen werden durch die Teilnehmer in Oberglatt angeliefert.

Die Wägescheine werden durch die UniBE kontrolliert und es wird von jeder Lieferung eine Rückstellprobe entnommen.

Die DHZ AG erstellt eine Offerte für alle Teilnehmer MetExSlag (Saidef, ZAV Recycling AG, Elbisgraben) mit folgenden Angaben:

- Preis für rückgewonnenes Alu CHF/t
- Preis für rückgewonnene NE-Schwer CHF/t.

Die Metallpreise werden zeitnah angeboten und dem aktuellen Preisspiegel bei der Prozessierung angepasst, mit Angaben zu

- Aufbereitungskosten CHF/t
- Entsorgungskosten Restschlacke CHF/t

Inklusive ist der Transport der produzierten Restschlacke nach Lufingen sowie der zusätzliche Aufwand für Versuchsdurchführung, Probenahme und Chargenaufbereitung für diese Studie.

Bei der Abgeltung war die UniBE nicht weiter involviert und kann allenfalls bei den Betreibern nachgefragt werden.

3. Durchführung der Probenahmen und der Veredelung

3.1. Durchführung der Probenahmen Q1:

Die Probenahmen auf den Anlagen fanden zwischen Juni bis Dezember 2021 statt. Die Probenahmepläne befinden sich im Anhang.

Auf allen Anlagen wurde durch die Uni Bern eine vollumfängliche Massenbilanz der anfallenden Massenströme erstellt.

Die ZAV Recycling AG bereitete während der Probenahme Trockenschlacke auf und schleuste für diesen Versuch die Q1 NE-Fractionen Mischfractionen aus. Zeitgleich beprobte die ZAV die Inputschlacken und einen Teilstrom der aufbereiteten NE-Metallfractionen.

Die R1-Schlacken wurden gemäss Probenahmepläne, während der gesamten Probenahmezeiten entnommen, geteilt und für die Restmetallbestimmung und die chemischen Analysen aufbereitet.

Zeitgleich zur Q1-Probenahme wurden auf jeder Anlage Stichproben der R1 Restschlacken zu einer Mischprobe vereint (ca. 1-2 Tonnen) und für die Restmetallbestimmung entsprechend aufbereitet.

Die chemische Bestimmung der R1 Schlacken wurde durch die BACHEMA AG an min. 2 Proben durchgeführt. Zusätzlich wurden von allen analysenfein gemahlene Proben XRF Totalanalysen durch die UniBE durchgeführt. Aluminium metallisch wurde durch die BACHEMA AG durchgeführt.

Von allen analysierten Fractionen wurden Rückstellproben erstellt.

3.2. Durchführung der Veredelung auf der supersort^{metall} bei der DHZ

Die Anlieferung der einzelnen Chargen bei der DHZ wurde von der UniBE begleitet. Es wurden die Wägescheine erfasst, kontrolliert und von jeder Lieferung (ca. 20 Tonnen) je eine Rückstellprobe entnommen.

Die Anlage wurde vorgängig entleert und gereinigt und die Chargen wurden einzeln (1-2 Tage pro Charge) prozessiert. Die Chargen mit sehr hohen Metallanteilen (Anlage A und D) benötigten 2 Tage für die Prozessierung. Es wurden für alle Chargen identische Prozessparameter gewählt. Alle Aufbereitungen wurden von der UniBE mit 3-4 Personen begleitet, welche gemäss Probenahmeplan Stichproben aller Stoffströme für die Analytik entnahmen (Anhang 6.6). Alle Gewichte wurden automatisch über das Prozessleitsystem erfasst und von der UniBE überprüft.

Für alle Versuche wurde eine Input-Output-Bilanz erstellt.

Die Mengen bzw. Bilanzen sind im Anhang «Bilanzen» aufgeführt; alle Wägescheine, Probenahmeprotokolle und Fotodokumentation sind bei der UniBE hinterlegt.

Für die Untersuchung des Eluatverhaltens wurde die R2 Schlacke aus der Metallveredelung anteilmässig zur R1-Schlacke gemischt. Damit wird die effektive Menge und Qualität der abzulagernden Schlacke berücksichtigt, auch wenn diese auf unterschiedlichen Deponien abgelagert wird.

Alle Fractionen, welche chemisch analysiert werden, wurden homogenisiert, über Probenteiler reduziert und entsprechend ihren Anteilen wurden die Mischproben (L1, L2, S1, S2) sowie die Einzelproben (LF1, M1, M2, R2 bestehend aus Rs1 und RE1) gem. Abb. 1 (rechts) für die weitere Analyse hergestellt.

Die Restmetallbestimmung sowie die chemische Bestimmung der Metallgehalte der R2 Schlacken wurde durch die BACHEMA AG an min. 2 Proben durchgeführt. Zusätzlich wurden von allen analysenfein gemahlten Proben XRF Totalanalysen durch die UniBE durchgeführt. Aluminium metallisch wurde durch die BACHEMA AG durchgeführt.

Alle metallurgischen Analysen wurde durch IMG GmbH durchgeführt.

3.3. Massenbilanz Q1

Die Anzahl und Bezeichnungen der aufgenommenen Fraktionen (Abb. 4.1) weichen bei den Anlagen A, B und D z.T. von den Fraktionen der Probenahmekonzepte im Anhang ab.

Alle erhobenen Fraktionen sind in der Bilanz aufgeführt, wurden aber bei der Darstellung des Ertrags (Abb. 4.2) und bei der Berechnung und Darstellung (Abb. 4.10.) der Effizienz (rückgewonnene vs. in den Restschlacken verbleibende Metalle) nicht einbezogen, da alle Anlagen die grobkörnigen Komponenten effizient abscheiden. Je nach Herkunft der Schlacken werden grobe Metallteile bereits entfernt, bevor die Schlacken auf den Anlagen aufbereitet werden.

Die Vergleichbarkeit der Anlagenperformance ist genauer, wenn nur die Metallfraktionen <40mm in Bezug auf die Restschlacken (R1+R2) betrachtet werden.

3.4. Massenbilanz Q2

Die Massenbilanz beruht auf folgenden Messungen und Annahmen:

- den erhobenen Anteilen aller Fraktionen auf der supersort^{metall}
- den Mischungen der Fraktionen L1F, L1, L2, S1 und S2
- den Schmelzerträgen und den chemischen Zusammensetzungen der Fraktionen L1F, L1, L2, S1 und S2
- den Anteilen der Handsortierung der Misch-Fraktionen >20mm (M1 und M2: Al-schwer, Al-leicht (Al-Folien ähnliche Bestandteile), NE-schwer, VA-Stahl, Schlacke, Organisch, Feinmaterial) und der Fraktion >40mm der Anlage D
- den chemischen Zusammensetzungen der Fraktionen *Al-massiv* und *Al-leicht* aus der Handsortierung wurde aus dem Mittelwert der Fraktionen L2 bzw. L1 berechnet, die Zusammensetzung für die Fraktion NE-schwer wurde der Mittelwert von S2 verwendet. Die chemischen Beiträge der Fraktionen *VA-Stahl*, *Schlacke*, *Organisch* und *Feinmaterial* wurden nicht berücksichtigt, da sie für die bilanzierten Metalle wie Cu, Zn, Pb nicht relevant sind

Die Bilanzen der Q2-Metalle wurden entsprechend den Q1-Metallen auf <40mm und die Restschlacken R1+R2 bezogen.

Die Effizienz der Metallabscheidung ergibt sich aus den prozentualen Anteilen eines rückgewonnenen Metalls in Bezug auf den Totalgehalt, wobei der Totalgehalt der Restschlacken chemisch bestimmt wurde, mit Ausnahme von Aluminium (Wasserstoffentwicklung). Alle Al Werte der R1- und R2-Schlacken, welche in der Bilanzierung verwendet wurden, wurden über die Wasserstoff-Methode bestimmt.

4. Resultate

4.1. Massenbilanz

Die Anzahl der separierten Fraktionen unterscheidet sich stark bei den vier Anlagen. In der Anlage B wurden 12 Fraktionen erfasst bei Anlage A 6 Fraktionen. Die Massen der aufbereiteten Input-Schlacken betrug ca. 1'800 bis 3'400 Tonnen. Der Anteil aller rückgewonnenen Fraktionen betrug von ca. 7 bis ca. 19 Gew. %, dabei gilt es zu berücksichtigen, dass die Wassergehalte der verbleibenden Restschlacken sehr unterschiedlich sind.

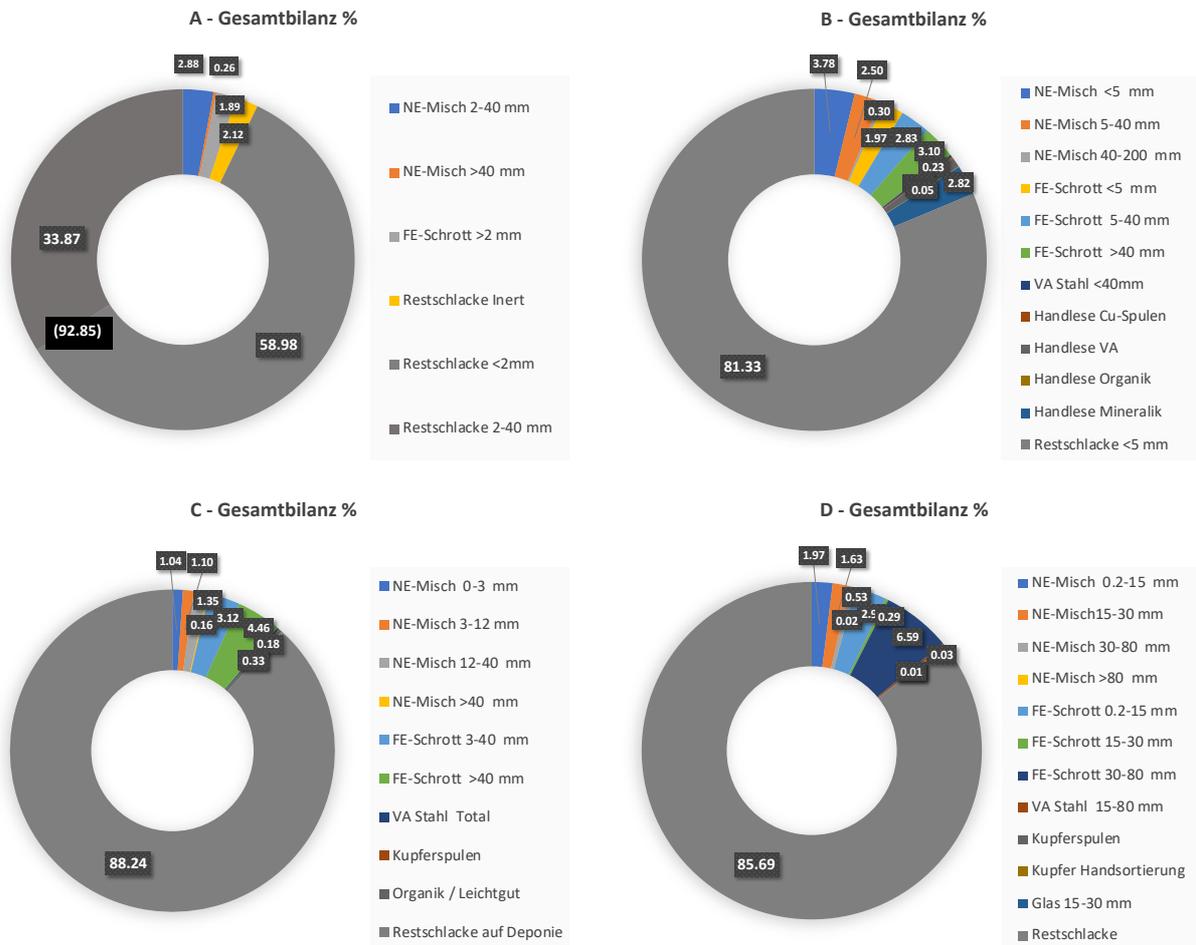


Abb 4.1. Prozentuale Verteilung der erfassten Fraktionen ab Anlagen.

4.2. Metallrückgewinnung Q1

Betrachtet man die Schlacken und die in Q1 separierten Metalle, wie sie während den Versuchen erhoben wurden, so ergeben sich sehr grosse Unterschiede von ca. 3.4 bis 7.8 Gew. % (Abb. 4.2. blaue Balken). Damit die Metalleinteile vergleichbar werden, müssen die Massen auf die Trockensubstanz bezogen und um den Anteil der Schlackenanhafungen korrigiert werden. Dazu wurden die Resultate der Veredelung herangezogen. In Abb. 4.2. werden die Auswirkungen sichtbar, sie bewegen sich zwischen 2.2 und 3.8 Gew. % und die «korrigierten» Differenzen sind entsprechend etwas kleiner als bei den separierten Q1-Metallen dargestellt. Die Grafik 4.2 zeigt grosse Unterschiede zwischen den einzelnen Schlackenaufbereitungsanlagen. Die Anlagen A und D produzieren relativ saubere NE-Metalle, die Anlagen B und C weisen

deutlich höhere Schlackenanteile auf, was bei den Schmelzwerken zu einem höheren Aufwand führen dürfte.

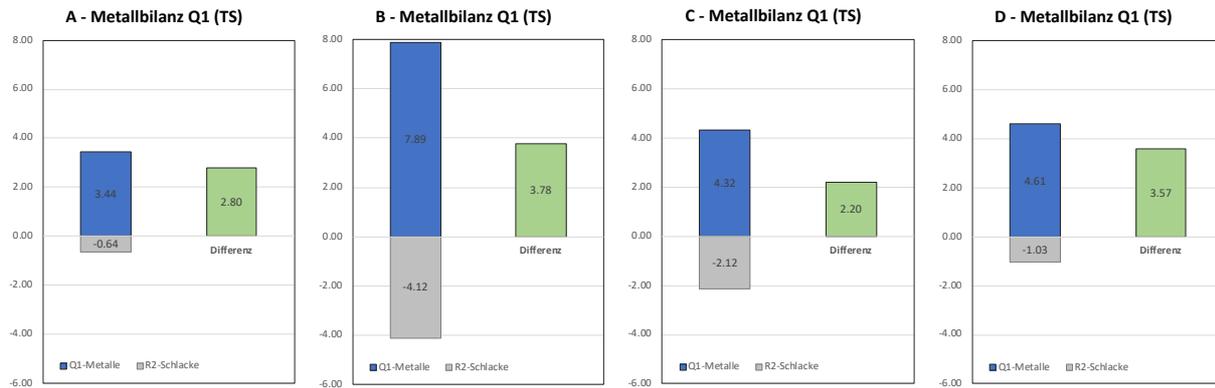


Abb 4.2. Prozentuale Anteile der Q1-Metalle in blau. Abzüglich der Schlackenanhafungen (grau) ergibt sich der NE-Metallanteil in grün (bezogen auf TS der R1-Restschlacke). Bei A, B und C beziehen sich die Werte des NE-Mix auf 0-40 mm und bei D auf 0-80mm.

Die Tabellen mit den erfassten Mengen der Fraktionen, der Umrechnung auf die NE-Fraktionen und der Korrektur auf die Trockensubstanz befinden sich im Anhang 6.6.

4.3. Restmetallgehalte der R1-Schlacken

Die Restmetallbestimmung wurde in dieser Studie durchgeführt, um die Vorgaben nach VVEA zu überprüfen. Die erhobenen Metallanteile wurden nicht für die Bilanzierung verwendet. Die Analysen wurden gemäss VVEA und Vollzugshilfen durch die Bachema AG durchgeführt. Es wurden jeweils 2 Teilproben analysiert. Die Doppelbestimmungen zeigen sehr kleine Differenzen. Zusätzlich wurden jeweils eine Probe nach dem Entfernen der Restmetalle und eine Originalprobe (mit Restmetallen) analysefein gemahlen. Der Methodenvergleich der NE-Restmetallbestimmung mit verschiedenen Verfahren wird in einem separaten Bericht beleuchtet. Es gilt jedoch zu erwähnen, dass die separat durchgeführten NE-Restmetallbestimmungen mit unterschiedlichen Methoden systematische Abweichungen zeigen.

Alle Proben unterschreiten den Grenzwert von 1 Gew. % NE-Metalle in der Fraktion 2-16mm, die Unterschiede sind allerdings gross: von 0.11 bis 0.82 Gew.%. Die Detaildaten befinden sich im Anhang 6.7.

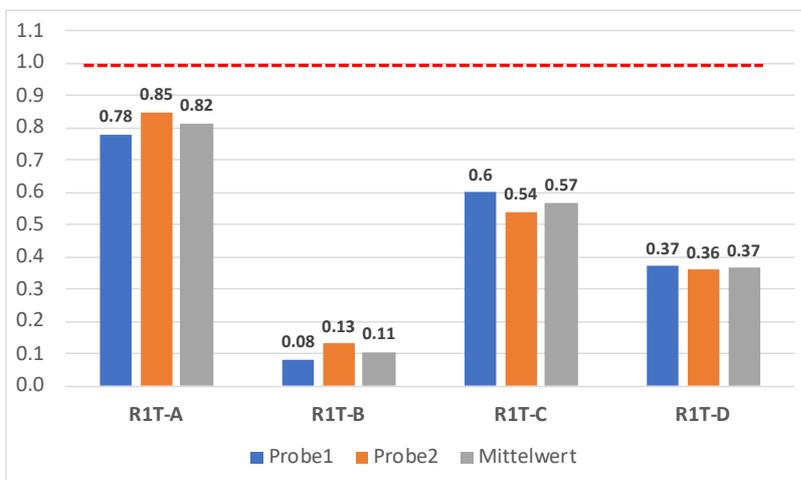


Abb 4.3. Restmetallgehalte der R1 Schlacken der 4 Anlagen gem. VVEA.

Bei der Verteilung der Korngrößenfraktionen der NE-Restmetalle liegt das grösste Potential bei allen Anlagen in der Korngrösse 2-8mm. Anlage A hat hier das grösste Potential mit 0.63 Gew. % oder >75% des gesamten NE-Restgehaltes. Anlage B zeigt in den Fraktionen <8mm ähnliche und sehr tiefe Gehalte und keine Metalle in den Fraktionen >8mm. Anlage C zeigt ein ähnliches Verteilungsmuster wie Anlage A, mit konstant tieferen Gehalten. Anlage D zeigt eine gute Performance in den NE-Fraktionen, weist aber die deutlich höchsten FE-Restmetallgehalte auf, was in der Darstellung der relativen Gehalte deutlich wird.

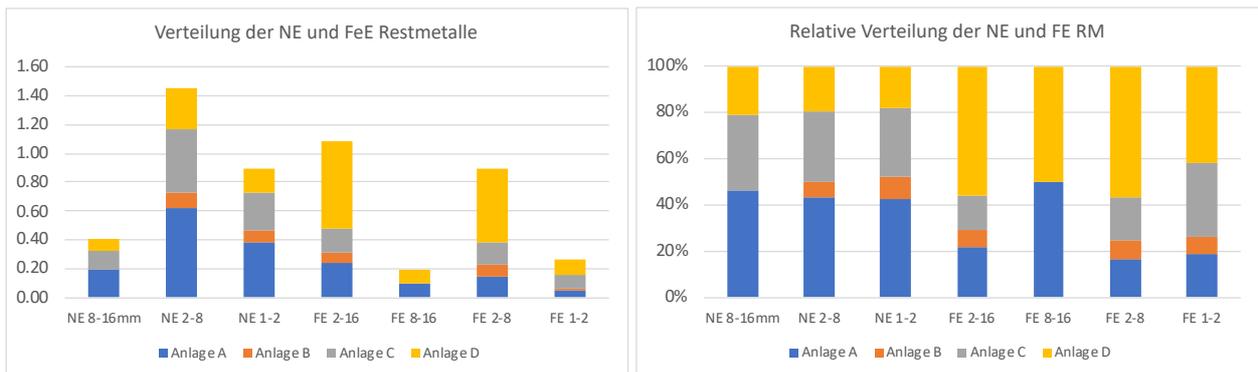


Abb 4.4. Absolute Gehalte und relative Verteilung der NE und FE Metalle der Restmetallbestimmung nach VVEA (Korngrössenklassen in mm, Gehalte in Gew.%).

4.4. Veredelung Q2 und Metallqualität

Es wurden zwischen 88 und 115 Tonnen Q1-Metalle prozessiert. Die Verluste zwischen der Anlieferung bis nach der Aufbereitung waren bei allen Chargen sehr gering, zwischen 0.9 bis 2.7%. Je trockener die Schlacken der entsprechenden Chargen sind, desto geringer ist der Verlust (siehe Anlage D). Der effektive Verlust durch den Umschlag und die Prozessierung (ohne Wasserverlust) dürfte bei allen Chargen <1 Gew. % betragen.

Tab. 4.1. Bilanz von der Anlieferung bis zur Summe der aufbereiteten Fraktionen.

Anlage	Anlieferung	Eingang t	Ausgang t	Verlust %
Anlage A	22.-23.9.2021	90.560	88.078	2.74
Anlage B	22.-23.9. 2021	101.840	100.683	1.14
Anlage C	04.-05.11.2021	116.120	114.573	1.33
Anlage D	04.-23.11. 2021	103.870	102.921	0.91

Die Bilanz der Aufbereitung wurde über die 21 anfallenden Fraktionen erstellt, wobei die NE-leicht und NE-schwer Fraktionen entsprechend ihrer Verteilung und gemäss dem Probenahmekonzept zu Mischproben vereint und analysiert wurden.

In den folgenden Tabellen sind die Massen, die prozentualen Anteile sowie deren chemische Zusammensetzungen und Ausbeuten der 4 Chargen gelistet. Für eine einfachere Vergleichbarkeit der Daten sind die Massen zusätzlich auf 100 Tonnen Q1-Fraktion dargestellt. Unter (A...D t) sind die erhaltenen Mengen in Tonnen angegeben und unter (A..D %) die entsprechende Anteile auf 100 Tonnen (entspricht dann für Q1-Fraktionen = 100%). Entsprechend sind die erfassten Mengen der R1-Schlacken (A...D t) und die berechneten Mengen (A..D %) dargestellt, die bei 100 Tonnen Q1-Metallen anfallen.

Tab. 4.2. Anteile der Q2-Fraktionen und deren chemische Zusammensetzung in Gew.%. Für die R1 Schlacken sind die chemischen Zusammensetzungen der Originalproben und die nach der Restmetallbestimmung aufgeführt. Gehalte für Au und Ag in ppm.

	Anlage A				Analyse																			
	Fraktion mm	A t	A %	Anteil	H2O	GV	Si %	AL% Rest	Fe %	Cu %	Mn %	Mg %	Cr %	Ni %	Zn %	Pb %	Sn %	Ti %	V %	Au ppm	Ag ppm	Summe	Ausbeute %	
NE-leicht	L1F0.3-1.8	4.086	4.639				1.36	91.80	0.89	1.73	0.400	0.060	0.035	0.029	3.440	0.073	0.067	0.058	0.006				99.95	92.43
	L1 1.8-8	28.23	32.05				1.03	96.70	0.71	0.40	0.350	0.280	0.021	0.016	0.380	0.044	0.021						99.95	98.70
	L2 8-20	22.481	25.524				1.29	95.60	0.55	1.09	0.230	0.280	0.036	0.047	0.750	0.032	0.015	0.022					99.94	97.54
																								97.76
NE-schwer	S1 0.3-8	9.265	10.519				<0.1	1.62	0.14	59.00	0.005			0.240	36.590	1.480	0.570			29.1	3411		99.99	96.15
	S2 8-20	3.638	4.130				<0.05	2.38	0.74	43.38	0.029			1.450	49.700	1.220	0.130						99.03	96.82
																								96.34
NE-Mix	M1 20-30	1.553	1.763				1.39	77.76	13.36	3.80	0.205	0.156	0.058	0.175	2.683	0.114	0.022	0.021					99.75	97.34
	M2 >30	1.740	1.976				1.43	59.42	17.86	9.40	0.168	0.119	0.044	0.400	6.836	0.275	0.036	0.016					96.00	97.34
	Fe	0.180	0.204																					
Schlacken-Anhaftungen	R2S Staub Sichter	3.820	4.337		0.70			11.80	2.40	2.30			0.041	0.032	2.200	0.270				7.6				100
	R2E Staub Entstauber	13.090	14.862		4.65			5.94	2.10	1.90			0.039	0.033	2.000	0.200				3.1				100
	Total	88.078	100.000	3.004																				
R1-Rest-schlacke	Fraktion mm	A t	A %	Anteil	H2O	GV	Si %	AL% Rest	Fe %	Cu %	Mn %	Mg %	Cr %	Ni %	Zn %	Pb %	Sn %	Ti %	V %	Au ppm	Ag ppm	Summe	Metall%	
	R1T-A1 ohne Restmet.	2844.380	2822.485	96.996	12.60	4.565	19.24	1.07	4.59	0.32	0.094	1.184	0.062	0.017	0.276	0.092	0.038	0.967						100
	R1T-A3 mit Restmet.	2844.380	2822.485	96.996	12.60	4.518	19.34	1.51	4.78	0.49	0.095	1.154	0.111	0.035	0.303	0.097	0.047	0.931		1.1				100

	Anlage B				Analyse																			
	Fraktion mm	B t	B %	Anteil	H2O	GV	Si %	AL% Rest	Fe %	Cu %	Mn %	Mg %	Cr %	Ni %	Zn %	Pb %	Sn %	Ti %	V %	Au ppm	Ag ppm	Summe	Ausbeute %	
NE-leicht	L1F0.3-1.8	5.302	5.266				1.77	92.70	0.86	1.26	0.380	<0.005	0.027	0.025	2.730	0.097	0.050	0.043	0.006				99.95	82.65
	L1 1.8-8	16.90	16.78				1.58	95.70	0.74	0.59	0.380	0.120	0.028	0.026	0.760	0.061	0.017						100.00	95.96
	L2 8-20	9.309	9.246				1.55	94.90	0.52	1.27	0.230	0.200	0.025	0.048	1.170	0.039	0.017	0.022	<0.005				99.99	98.19
																								94.38
NE-schwer	S1 0.3-8	7.660	7.608				0.041	1.22	0.10	67.73	0.006			0.290	27.240	2.550	0.660			122.0	3382		100.19	97.38
	S2 8-20	1.689	1.678				<0.05	1.03	0.22	62.33	0.021			1.900	32.100	1.240	0.170						99.01	98.61
																								97.60
NE-Mix	M1 20-30	0.464	0.461				1.39	64.24	20.42	7.37	0.18	0.129	0.048	0.318	5.334	0.217	0.031	0.018					99.70	97.34
	M2 >30	0.560	0.556				1.36	33.24	29.62	15.23	0.11	0.066	0.024	0.632	11.183	0.442	0.050	0.009					91.97	97.34
	Fe	0.150	0.149																					
Schlacken-Anhaftungen	R2S Staub Sichter	29.320	29.121		0.81			2.83	1.30	1.40			0.027	0.015	2.100	0.450				3.1				100
	R2E Staub Entstauber	29.330	29.131		4.28			0.65	1.50	1.00			0.028	0.018	1.300	0.200				2.0				100
	Total	100.683	100.000	6.535																				
R1-Rest-schlacke	Fraktion mm	B t	B %	Anteil	H2O	GV	Si %	AL% Rest	Fe %	Cu %	Mn %	Mg %	Cr %	Ni %	Zn %	Pb %	Sn %	Ti %	V %	Au ppm	Ag ppm	Summe	Metall%	
	R1T-B1 ohne RM	1440.000	1270.475	93.465	11.17	2.932	18.09	0.62	7.868	0.305	0.131	1.189	0.079	0.028	0.398	0.125	0.030	0.928						100
	R1T-B3 mit RM	1440.000	1270.475	93.465	11.17	4.424	17.24	0.54	7.948	0.355	0.139	1.182	0.082	0.028	0.408	0.136	0.032	0.914		0.6				100

	Anlage C				Analyse																			
	Fraktion mm	C t	C %	Anteil	H2O	GV	Si %	AL% Rest	Fe %	Cu %	Mn %	Mg %	Cr %	Ni %	Zn %	Pb %	Sn %	Ti %	V %	Au ppm	Ag ppm	Summe	Ausbeute %	
NE-leicht	L1F0.3-1.8	4.873	4.253				1.63	91.82	1.13	2.11	0.390	0.006	0.036	0.037	2.560	0.160	0.070	0.051					100.00	68.98
	L1 1.8-8	18.80	16.41				1.11	96.34	0.68	0.68	0.390	0.092	0.023	0.022	0.520	0.074	0.020	0.045					100.00	95.63
	L2 8-20	16.816	14.677				1.56	94.77	0.78	1.45	0.220	0.085	0.160	0.140	0.740	0.048	0.016	0.027					100.00	96.65
																								92.85
NE-schwer	S1 0.3-8	9.828	8.578				0.061	0.61	0.50	72.59	0.010			0.310	18.860	3.470				97.0	2914		96.71	97.71
	S2 8-20	2.859	2.495				2.150	1.73	12.20	51.54	0.150			2.430	28.090	1.630							99.92	96.04
																								97.33
NE-Mix	M1 20-30	1.426	1.245				1.36	68.40	19.11	5.79	0.185	0.137	0.051	0.254	4.162	0.171	0.026	0.019					99.68	97.34
	M2 >30	1.460	1.274				1.34	53.50	21.84	9.51	0.153	0.107	0.040	0.403	6.928	0.278	0.036	0.015					94.15	97.34
	Fe	0.240	0.209																					
Schlacken-Anhaftungen	R2S Staub Sichter	22.420	19.568		4.20			2.73	2.00	1.90			0.040	0.023	1.600	0.690				2.6				100
	R2E Staub Entstauber	35.850	31.250		0.89			0.93	2.00	1.30			0.037	0.023	1.100	0.330				1.0				100
	Total	114.573	100.000	3.700																				
R1-Rest-schlacke	Fraktion mm	C t	C %	Anteil	H2O	GV	Si %	AL% Rest	Fe %	Cu %	Mn %	Mg %	Cr %	Ni %	Zn %	Pb %	Sn %	Ti %	V %	Au ppm	Ag ppm	Summe	Metall%	
	R1T-C1 ohne RM	2982.000	2226.691	95.400	13.64	2.859	18.33	0.55	8.36	0.44	0.156	1.277	0.106	0.035	0.386	0.129	0.030	0.986						100
	R1T-C3 mit RM	2982.000	2226.691	95.400	13.64	3.067	17.74	0.95	8.50	0.51	0.154	1.256	0.115	0.045	0.411	0.161	0.028	1.005		0.5				100

korrigiert nach Rev. IMG

	Anlage D				Analyse																			
	Fraktion mm	D t	D %	Anteil	H2O	GV	Si %	AL% Rest	Fe %	Cu %	Mn %	Mg %	Cr %	Ni %	Zn %	Pb %	Sn %	Ti %	V %	Au ppm	Ag ppm	Summe	Ausbeute %	
NE-leicht	L1F0.3-1.8	11.400	11.076				1.76	93.68	0.97	1.76	0.390	0.016	0.023	0.033	1.150	0.110	0.061	0.049					100.00	91.49
	L1 1.8-8	25.31	24.59				1.38	95.87	0.82	0.73	0.420	0.170	0.024	0.023	0.430	0.065	0.022	0.044					100.00	97.57
	L2 8-20	19.819	19.257				1.67	94.75	0.82	1.42	0.300	0.200	0.063	0.075	0.600	0.054	0.017	0.034					100.00	98.26
																								96.59
NE-schwer	S1 0.3-8	11.921	11.583				0.052	1.12	0.29	66.64	0.008			0.240	24.600									

In Abb 4.5. werden die sehr unterschiedlichen Gehalte an abgeschiedenen Reststoffen (R2E und R2S) deutlich. Die Fahrweisen und die Anlagenparameter waren bei allen Chargen identisch. Bei den hier untersuchten Chargen zeigte sich, dass bei höheren R2 Schlackenanteilen die Anteile der Schlacke aus dem Sichter im Verhältnis zur Schlacke aus dem Entstauber zunehmen, was auf das Abschlagen von grösseren Anbackungen schliessen lässt. Die relative Verteilung der Metalle ohne Schlacken zeigt nur geringe Unterschiede: Bei Anlage A sind generell die gröberkörnigen Fraktionen etwas stärker vertreten, bei der Anlage B sind es die feiner-körnigen Fraktionen.

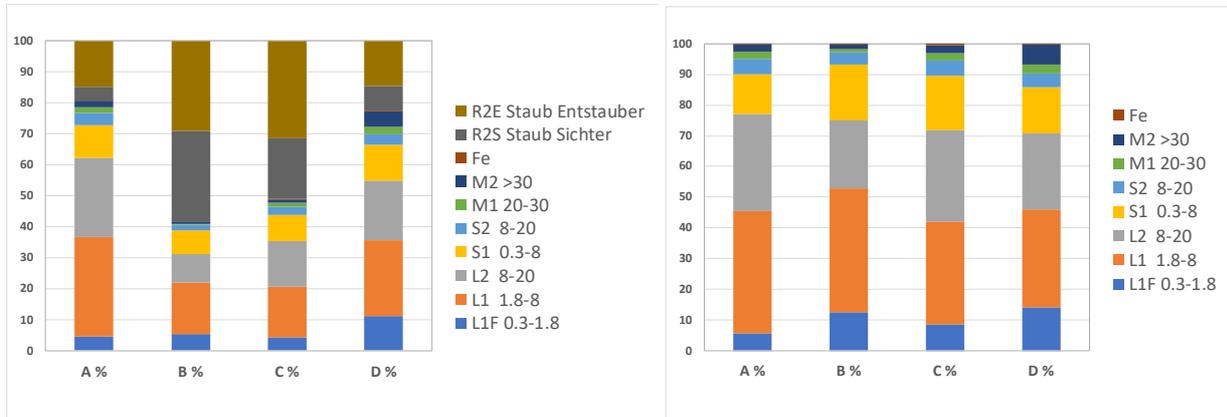


Abb 4.5. Verteilung der Massen aller Fraktionen (links inkl. R2) und die relative Verteilung der Metallfraktionen ohne R2 (rechts).

Für die Berechnung der Metallbilanz wurden die Schmelzerträge und die chemischen Analysen aus Tab. 4.2. verwendet und in Bezug auf 100 Tonnen R1-Input Schlacke dargestellt, ohne die vorgängig separierten Fraktionen >40mm bzw. >80mm.

Gewichtung	Ausgangsdaten			Ausbeuten / Verluste		
	Fraktion	Elemente & Konzentrationen	Messung und Gewichtung			
Anteile in Gew.% TS Tab. 4.2. (A..D% x Anteil)	NE-Leicht	0.3 - 1.8 1.8 - 3.0 3.0 - 20	Al / Cu / Zn / Pb / ... Al / Cu / Zn / Pb / ... Al / Cu / Zn / Pb / ...	Schmelzanalysen und Ausbeuten Tab. 4.2.	Ausbeuten Tab. 4.3.	
	NE-Schwer	0.3 - 8.0 8.0 - 20	Cu / Zn / Pb / Al / ... Cu / Zn / Pb / Al / ...			
	NE-Mix	20 - 30 >30	Al / Cu / Zn / Pb / ... Al / Cu / Zn / Pb / ...	Zusammensetzung aus Fraktionen der Handsortierung berechnet (Anhang A.8.)		
	R2E	Entstauber	Al / Cu / Zn / Pb / ...	Chemische Aufschlussanalysen Tab. 4.2.		Verluste Tab. 4.3.
	R2S	Sichter	Al / Cu / Zn / Pb / ...			
	R1	Restschlacke	Al / Cu / Zn / Pb / ...			

Abb 4.6. Schematische Darstellung die Berechnung der Gesamtbilanz mit Quellenangabe und verwendeter Analytik.

Die Anteile an Metallen in der Restschlacke (R1+R2) wurde über die chemischen Analysen der Fraktionen in den Gruppen «Schlacken-Anhaftungen R2» und «R1-Restschlacke mit Restmet.» der Tab. 4.2. berechnet. Die Ausbeuten der Chargen aus den 4 Anlagen sind in den folgenden Tabellen in Tonnen Metalle pro 100 Tonnen Inputschlacke zusammengefasst (entspricht Gew. %; bei Au und Ag in Gramm/100t).

Tab. 4.3. Ausbeuten der rückgewonnenen Metalle für NE-leicht und NE-schwer, sowie die chemischen Metallgehalte in den Restschlacken in Tonnen pro 100 Tonnen Inputschlacke der Anlagen A-D. Gold und Silber in Gramm pro 100 Tonnen Inputschlacke. Für die Bilanzierung wurden die Werte in den markierten Feldern verwendet (die verwendeten Summen sind fett dargestellt).

	Anlage A		Ausbeuten in der Metallfraktion bezogen auf 100 Tonne Input-Schlacke (in t)													
	Fraktion mm	Si t	Al t Rest	Fe t	Cu t	Mn t	Mgt	Cr t	Ni t	Zn t	Pb t	Sn t	Ti t	V t	Au gr	Ag gr
NE-leicht	L1F 0.3-1.8	0.002	0.139	0.001	0.003	0.001	0.000	0.000	0.000	0.005	0.000	0.000	0.000	0.000		
	L1 1.8-8	0.012	1.084	0.008	0.004	0.004	0.003	0.000	0.000	0.004	0.000	0.000	0.000	0.000		
	L2 8-20	0.011	0.843	0.005	0.010	0.002	0.002	0.000	0.000	0.007	0.000	0.000	0.000	0.000		
	Tot. Al inkl. M1+M2	0.025	2.154	0.014	0.017	0.007	0.006	0.001	0.001	0.016	0.001	0.000	0.001	0.000		
NE-schwer	S1 0.3-8		0.006	0.001	0.211	0.000	0.000	0.000	0.001	0.131	0.005	0.002	0.000	0.000	10.4	1222.3
	S2 8-20		0.003	0.001	0.061	0.000	0.000	0.000	0.002	0.070	0.002	0.000	0.000	0.000		
	Tot. Cu/Zn/Pb inkl. M1+M2	0.000	0.009	0.002	0.282	0.000	0.000	0.000	0.003	0.208	0.007	0.002	0.000	0.000		
NE-Mix	M1 20-30	0.001	0.047	0.008	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000		
	M2 >30	0.001	0.040	0.012	0.006	0.000	0.000	0.000	0.000	0.005	0.000	0.000	0.000	0.000		
	Fe															
Schlacken-Anhaftungen	R2S Staub Siebter		0.018	0.004	0.004	0.000	0.000	0.000	0.000	0.003	0.000				1.2	
	R2E Staub Entstauber		0.031	0.011	0.010	0.000	0.000	0.000	0.000	0.011	0.001				1.6	
	Total R2S+R2E		0.049	0.015	0.014	0.000	0.000	0.000	0.000	0.014	0.001					
R1-Rest-schlacke	Fraktion mm	Si t	Al t Rest	Fe t	Cu t	Mn t	Mgt	Cr t	Ni t	Zn t	Pb t	Sn t	Ti t	V t	Au gr	Ag gr
	R1T-A1 ohne Restmet.	19.236	1.070	4.586	0.324	0.094	1.184	0.062	0.017	0.276	0.092	0.038	0.967			
	R1T-A3 mit Restmet.	19.339	1.510	4.782	0.490	0.095	1.154	0.111	0.035	0.303	0.097	0.047	0.931		110	

	Anlage B		Ausbeuten in der Metallfraktion bezogen auf 100 Tonne Input-Schlacke (in t)													
	Fraktion mm	Si t	Al t Rest	Fe t	Cu t	Mn t	Mgt	Cr t	Ni t	Zn t	Pb t	Sn t	Ti t	V t	Au gr	Ag gr
NE-leicht	L1F 0.3-1.8	0.006	0.318	0.003	0.004	0.001		0.000	0.000	0.009	0.000	0.000	0.000	0.000		
	L1 1.8-8	0.020	1.213	0.009	0.007	0.005	0.002	0.000	0.000	0.010	0.001	0.000	0.000	0.000		
	L2 8-20	0.011	0.678	0.004	0.009	0.002	0.001	0.000	0.000	0.008	0.000	0.000	0.000	0.000		
	Tot. Al inkl. M1+M2	0.037	2.246	0.016	0.021	0.008	0.003	0.001	0.001	0.027	0.001	0.000	0.001	0.000		
NE-schwer	S1 0.3-8		0.007	0.001	0.395	0.000		0.000	0.002	0.159	0.015	0.004	0.000	0.000	71.1	1972.2
	S2 8-20		0.001	0.000	0.081	0.000		0.000	0.002	0.042	0.002	0.000	0.000	0.000		
	Tot. Cu/Zn/Pb inkl. M1+M2	0.000	0.008	0.001	0.485	0.000	0.000	0.000	0.004	0.207	0.017	0.004	0.000	0.000		
NE-Mix	M1 20-30	0.000	0.023	0.007	0.003	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000		
	M2 >30	0.001	0.014	0.013	0.006	0.000	0.000	0.000	0.000	0.005	0.000	0.000	0.000	0.000		
	Fe															
Schlacken-Anhaftungen	R2S Staub Siebter		0.065	0.030	0.032	0.000	0.000	0.001	0.000	0.048	0.010				7.1	
	R2E Staub Entstauber		0.015	0.034	0.023	0.000	0.000	0.001	0.000	0.030	0.005				4.6	
	Total R2S+R2E		0.080	0.064	0.055	0.000	0.000	0.001	0.001	0.078	0.015					
R1-Rest-schlacke	Fraktion mm	Si t	Al t Rest	Fe t	Cu t	Mn t	Mgt	Cr t	Ni t	Zn t	Pb t	Sn t	Ti t	V t	Au gr	Ag gr
	R1T-B1 ohne RM	18.087	0.620	7.868	0.305	0.131	1.189	0.079	0.028	0.398	0.125	0.030	0.928	0.000		
	R1T-B3 mit RM	17.238	0.540	7.948	0.355	0.139	1.182	0.082	0.028	0.408	0.136	0.032	0.914	0.000	60	

	Anlage C		Ausbeuten in der Metallfraktion bezogen auf 100 Tonne Input-Schlacke (in t)													
	Fraktion mm	Si t	Al t Rest	Fe t	Cu t	Mn t	Mgt	Cr t	Ni t	Zn t	Pb t	Sn t	Ti t	V t	Au gr	Ag gr
NE-leicht	L1F 0.3-1.8	0.002	0.121	0.001	0.003	0.001	0.000	0.000	0.000	0.003	0.000	0.000	0.000	0.000		
	L1 1.8-8	0.008	0.679	0.005	0.005	0.003	0.001	0.000	0.000	0.004	0.001	0.000	0.000	0.000		
	L2 8-20	0.010	0.604	0.005	0.009	0.001	0.001	0.001	0.001	0.005	0.000	0.000	0.000	0.000		
	Tot. Al inkl. M1+M2	0.020	1.471	0.011	0.017	0.005	0.001	0.001	0.001	0.012	0.001	0.000	0.001	0.000		
NE-schwer	S1 0.3-8		0.002	0.002	0.273	0.000	0.000	0.000	0.001	0.071	0.013	0.000	0.000	0.000	36.5	1096.9
	S2 8-20		0.002	0.013	0.055	0.000	0.000	0.000	0.003	0.030	0.002	0.000	0.000	0.000		
	Tot. Cu/Zn/Pb inkl. M1+M2	0.000	0.004	0.015	0.337	0.000	0.000	0.000	0.004	0.107	0.015	0.000	0.000	0.000		
NE-Mix	M1 20-30	0.001	0.037	0.010	0.003	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000		
	M2 >30	0.001	0.030	0.012	0.005	0.000	0.000	0.000	0.000	0.004	0.000	0.000	0.000	0.000		
	Fe															
Schlacken-Anhaftungen	R2S Staub Siebter		0.024	0.018	0.017	0.000	0.000	0.000	0.000	0.014	0.006				2.3	
	R2E Staub Entstauber		0.013	0.028	0.018	0.000	0.000	0.001	0.000	0.015	0.005				1.4	
	Total R2S+R2E		0.037	0.046	0.035	0.000	0.000	0.001	0.001	0.030	0.011					
R1-Rest-schlacke	Fraktion mm	Si t	Al t Rest	Fe t	Cu t	Mn t	Mgt	Cr t	Ni t	Zn t	Pb t	Sn t	Ti t	V t	Au gr	Ag gr
	R1T-C1 ohne RM	18.334	0.550	8.356	0.437	0.156	1.277	0.106	0.035	0.386	0.129	0.030	0.986	0.000		
	R1T-C3 mit RM	17.742	0.950	8.501	0.505	0.154	1.256	0.115	0.045	0.411	0.161	0.028	1.005	0.000	50	

	Anlage D		Ausbeuten in der Metallfraktion bezogen auf 100 Tonne Input-Schlacke (in t)													
	Fraktion mm	Si t	Al t Rest	Fe t	Cu t	Mn t	Mgt	Cr t	Ni t	Zn t	Pb t	Sn t	Ti t	V t	Au gr	Ag gr
NE-leicht	L1F 0.3-1.8	0.009	0.459	0.005	0.009	0.002	0.000	0.000	0.000	0.006	0.001	0.000	0.000	0.000		
	L1 1.8-8	0.016	1.111	0.010	0.008	0.005	0.002	0.000	0.000	0.005	0.001	0.000	0.001	0.000		
	L2 8-20	0.015	0.866	0.007	0.013	0.003	0.002	0.001	0.001	0.005	0.000	0.000	0.000	0.000		
	Tot. Al inkl. M1+M2	0.040	2.659	0.022	0.030	0.010	0.004	0.001	0.001	0.016	0.002	0.001	0.001	0.000		
NE-schwer	S1 0.3-8		0.006	0.002	0.362	0.000	0.000	0.000	0.001	0.134	0.018	0.000	0.000	0.000	24.7	1739.0
	S2 8-20		0.004	0.021	0.067	0.000	0.000	0.000	0.004	0.060	0.003	0.000	0.000	0.000		
	Tot. Cu/Zn/Pb inkl. M1+M2	0.000	0.010	0.023	0.450	0.000	0.000	0.000	0.005	0.208	0.022	0.000	0.000	0.000		
NE-Mix	M1 20-30	0.001	0.075	0.017	0.005	0.000	0.000	0.000	0.000	0.004	0.000	0.000	0.000	0.000		
	M2 >30	0.003	0.148	0.040	0.015	0.000	0.000	0.000	0.001	0.011	0.000	0.000	0.000	0.000		
	Fe															
Schlacken-Anhaftungen	R2S Staub Siebter		0.030	0.017	0.015	0.000	0.000	0.000	0.000	0.004	0.003				1.5	
	R2E Staub Entstauber		0.031	0.029	0.021	0.000	0.000	0.000	0.000	0.005	0.002				1.5	
	Total R2S+R2E		0.061	0.046	0.036	0.000	0.000	0.001	0.000	0.009	0.005					
R1-Rest-schlacke	Fraktion mm	Si t	Al t Rest	Fe t	Cu t	Mn t	Mgt	Cr t	Ni t	Zn t	Pb t	Sn t	Ti t	V t	Au gr	Ag gr
	R1T-D1 ohne RM	19.318	0.910	8.721	0.629	0.154	1.441	0.110	0.035	0.375	0.117	0.027	0.864	0.000		
	R1T-D3 mit RM	18.871	1.080	9.450	0.811	0.146	1.400	0.131	0.045	0.393	0.136	0.031	0.917	0.000		40

4.5. Fehlerabschätzung und Fehlerfortpflanzung

Für die Abschätzung der Bestimmungsfehler der Massen und der Metallgehalte wurden eher konservative Annahmen getroffen (Tab. 4.4. oben). Bei der Berechnung der Fehlerfortpflanzung bei der Massenbilanzierung von R und Q2 (* in Abb. 4.4. unten) wurde deren Produkt über die Wurzel aus den Quadratsummen der Fehler von Masse und Gehalt berechnet. Die Fehlerfortpflanzung beim theoretischen Potential (***) ergibt sich aus der gewichteten Summe der Fehler der Massenbilanzen R + Q2 (0.43; 0.57), und der Fehler der berechneten Effizienz (***) ist der Quotient aus der Wurzel aus den Quadratsummen der Fehler von Massenbilanz Q2 und theor. Potential.

Tab. 4.4. Verwendete Bestimmungsfehler und deren Fortpflanzung.

Fehler %	A	B	C	D
Bestimmung Massen R	5	2	3	1
Bestimmung Massen Q	1.5	1.5	1.5	1.5
Bestimmung Metallgehalte R	15	15	15	15
Bestimmung Metallgehalte Q2	10	10	10	10
Fehler Massenbilanz R *	15.81	15.13	15.30	15.03
Fehler Massenbilanz Q2 *	10.11	10.11	10.11	10.11
Fehler theor. Potential **	12.56	12.27	12.34	12.23
Fehler Effizienz ***	16.13	15.90	15.96	15.87

Damit liegen die Fehler bei den Massenbilanzen R bei ca. 15%, bei der Massenbilanzierung von Q2 bei ca. 10%, beim theoretischen Potential bei 12% und bei der Effizienz steigt der Fehler auf ca. 16%.

In den folgenden Grafiken (Abb. 4.9.ff) sind die berechneten Werte numerisch angegeben und die berechneten Fehlerbereiche sind als Balken dargestellt.

4.6. Metallrückgewinnung

Die berechneten Anteile der erhaltenen Metalle aus den Schmelzanalysen und der Handsortierung (M1+M2) der veredelten Fraktionen in Bezug auf die Inputschlacken zeigen für Aluminium einen grossen Bereich von 1.5 bis 2.7 %, bzw. eine Abweichung von $\pm 30\%$ vom Mittelwert (2.1%). Kupfer und Zink zeigen geringere Unterschiede mit mittleren Anteilen von 0.39 bzw. 0.18% bezogen auf den Schlackeninput.

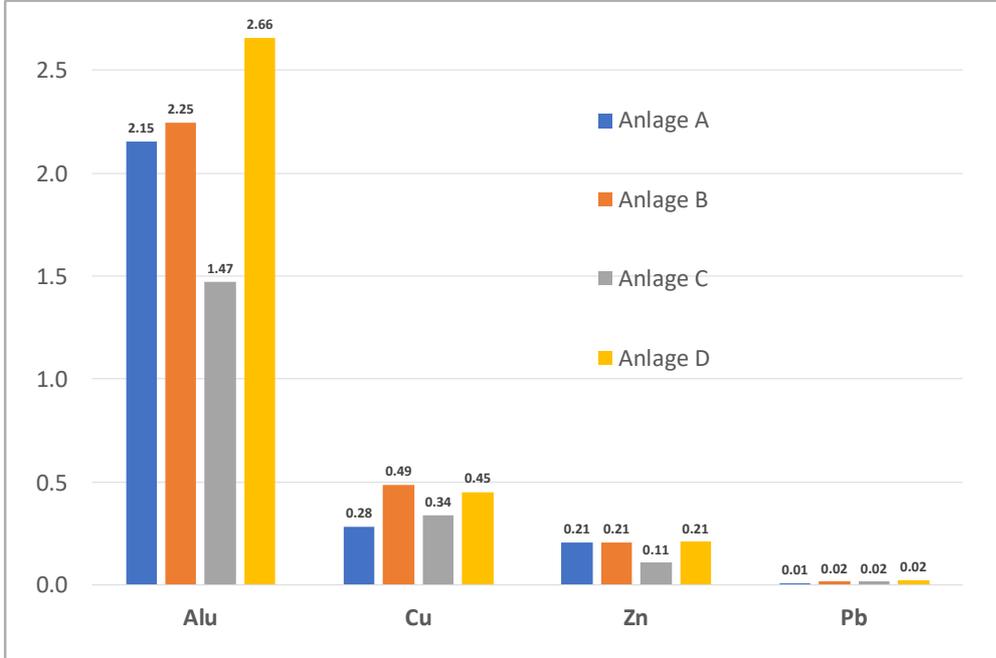


Abb 4.7. Anteile in Gew.% der Metalle Aluminium, Kupfer, Zink und Blei aus der Rückgewinnung in Bezug auf die Inputschlacken (ohne vorabgeschiedene Grobanteile >40/80 mm).

4.7. Chemisch bestimmte Metallverluste der Restschlacken

Den rückgewonnenen Mengen aus den veredelten Fraktionen stehen die Metalle in den Schlackenanhäufungen der R2-Schlacken und die der R1-Restschlacken gegenüber. Die Metalle Cu, Zn und Pb wurden nasschemisch bestimmt und beinhalten auch Anteile, die nicht metallisch vorliegen. Aluminium wurde über die Wasserstoffmethode bestimmt, diese Bilanz ist eine reine «Metallbilanz».

Die chemisch bestimmten Metallgehalte der R2-Schlacken (R2-Sichter + R2-Entstauber) liegen z.B. für Kupfer im Bereich von 1 bis 4 Gew. %. Im Vergleich zu den R1-Restschlacken liegen die Kupfer-Gehalte damit ca. 5-fach über den Gehalten der R1-Restschlacken (siehe Tab. 4.2.). Die R2-Anteile an der Gesamtschlacke sind aber sehr klein und liegen in der Grössenordnung von 1 bis 3%. Dies wird auch in der Darstellung der Massenbilanz deutlich, wo z.B. Kupfer maximal mit -0.08% zur Gesamtbilanz beiträgt.

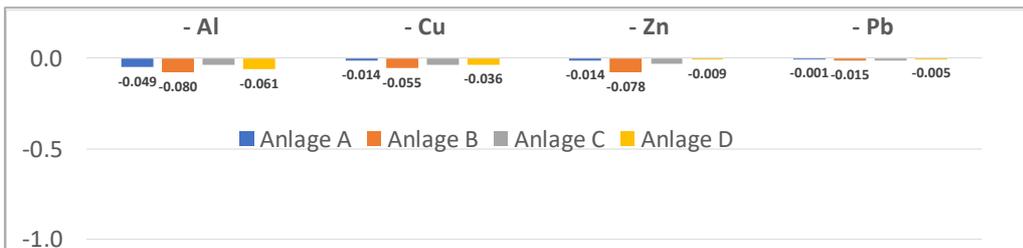


Abb 4.8. Chemische «Verluste» der Metalle durch die R2-Schlacken (Massstab wie Abb. 4.7.).

Dabei zeigen die chemisch bestimmten Anteile von Cu, Zn und Pb sowie das metallische Al in den R2-Schlacken rel. grosse Unterschiede bei allerdings sehr kleinen Anteilen (Abb 4.8).

Im Vergleich zu den R2-Schlacken tragen die R1-Restschlacken deshalb mit Anteilen von 93 - 97% massgeblich zu den in den Schlacken verbleibenden Metallen bei. In der kombinierten Grafik 4.9 sind im oberen Teil nochmals die rückgewonnenen Anteile (Abb. 4.7.) dargestellt und mit negativen Werten die in den Schlacken verbleibenden Metalle als Summe der R2-Schlacken (Abb. 4.8) zusammen mit denen der R1-Restschlacken.

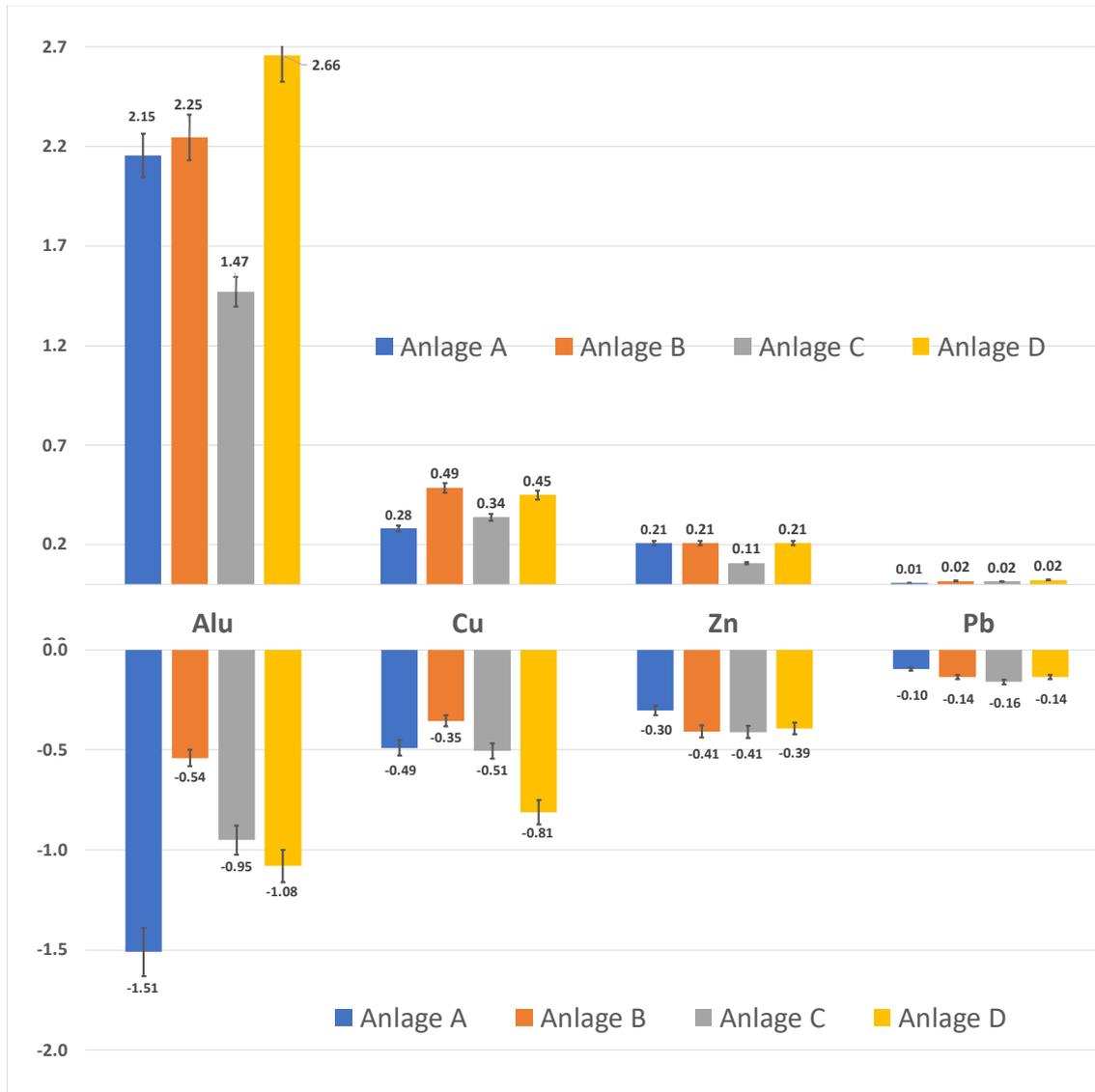


Abb 4.9. Prozentuale Anteile der gewonnenen Metalle in Bezug auf die Inputschlacken bestimmt über Schmelzanalysen der veredelten Q2-Fractionen (positive Werte). Die negativen Werte entsprechen den prozentualen Anteilen, welche in den R1 + R2-Restschlacken verbleiben. Die Gehalte in diesen Schlacken wurden für Al über die Wasserstoffmethode (metallisches Al) und für Cu, Zn und Pb über chemische Totalaufschlussmethoden bestimmt. Die Fehler wurden gem. Kap. 4.5. berechnet und sind als Balken dargestellt.

In der Darstellung 4.9. wird deutlich, dass die Anteile der Metalle mit abnehmenden Gehalten (Al>Cu>Zn>Pb) in den Restschlacken zunehmen. Beim metallischen Aluminium sind die Erträge noch deutlich höher als die Verluste in den Restschlacken, bereits bei Kupfer verbleiben in 3 Anlagen mehr

Kupfer in der Schlacke als zurückgewonnen wird. Die Unterschiede bei den Verlusten sind rel. gross: bei Aluminium zwischen 0.5 und 1.5% und bei Kupfer zwischen 0.36 und 0.81%. Die Unterschiede zwischen den Anlagen sind auch mit Einbezug der Fehlerrechnung signifikant.

4.8. Effizienz der Metallabscheidung

Um die Effizienz der Rückgewinnung in Bezug auf die zu deponierenden Metalle zu beurteilen, werden die berechneten Gesamtgehalte der Inputschlacken (Abb. 4.10.) den rückgewonnenen Metallen (Abb. 4.7.) gegenübergestellt.

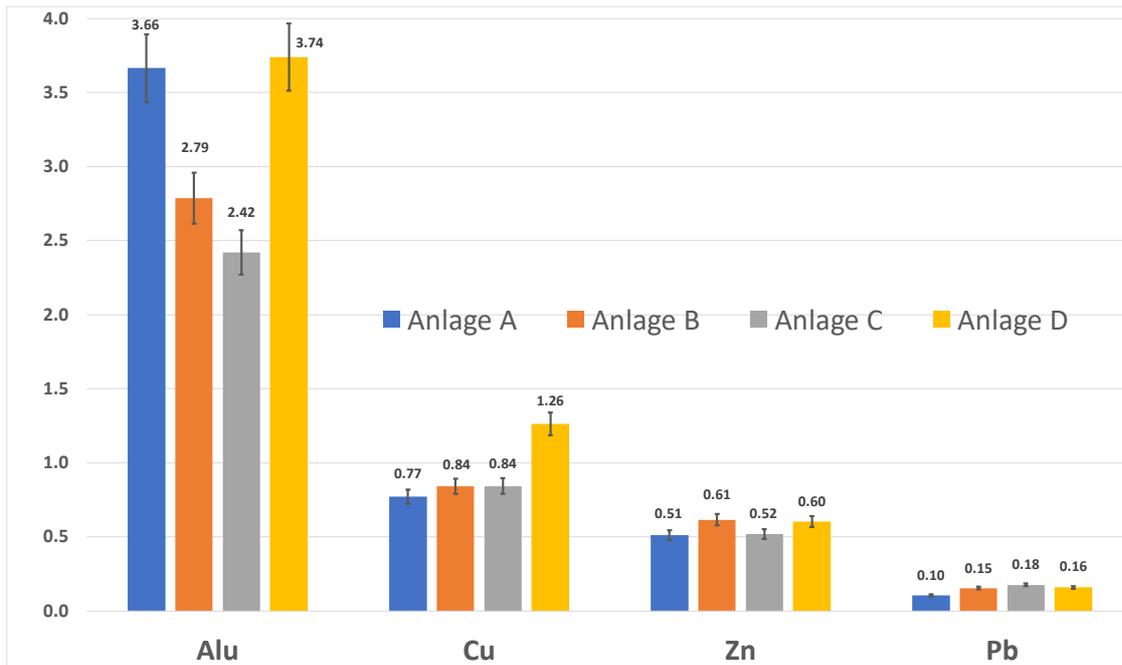


Abb 4.10. Metallpotential der Inputschlacken - metallisch bei Al und z.T. zusätzlich anders gebunden bei Cu, Zn und Pb. Die Fehler wurden gem. Kap. 4.5. berechnet und sind als Balken dargestellt.

Beim Metallpotential zeigen sich deutliche Unterschiede, wobei sich die Körnung der partikulären Metalle bei Anlage A-C auf 0-40mm und bei D auf 0-80mm beziehen. Die Inputschlacken der Anlagen A und D zeigen etwa 20% höhere metallische Aluminiumgehalte als der Mittelwert (3.15%). Auch bei Kupfer zeigt die Inputschlacke der Anlage D deutlich höhere Gehalte. Dabei gilt es zu berücksichtigen, dass die in den Schlacken chemisch bestimmten Anteile von Cu, Zn und Pb nicht mit mechanischen Methoden separiert werden können. In früheren Studien (Eggimann, 2008; Breitenstein, 2013; Glauser, 2022) wurde qualitativ gezeigt, dass z.B. eingeschlossene Metalltröpfchen im μm -Bereich sehr häufig auftreten. Da die Bedingungen in den Verbrennungsanlagen sehr ähnlich sind, dürfte die Verteilung der feinen Metalltröpfchen und die Anteile der nicht-metallisch gebundenen Metalle in allen Inputschlacken in einer ähnlichen Grössenordnung auftreten.

In Fig 4.11. ist die Effizienz als prozentualer Anteil der einzelnen rückgewonnenen Metalle in Bezug auf die Totalgehalte der Inputschlacken dargestellt. Während bei Aluminium noch zwischen 60 und 80% rückgewonnen wird, liegen die Werte für Kupfer mit 36 bis 58% bereits deutlich tiefer, bei Zink zwischen 21 und 41% und bei Blei werden lediglich noch zwischen 7 bis 14% abgeschieden. Die berechneten Fehlerbereiche werden bei der Effizienz grösser, und damit wird auch der Vergleich der Metalle innerhalb der Anlagen weniger robust, weisen aber dennoch signifikante Unterschiede auf.

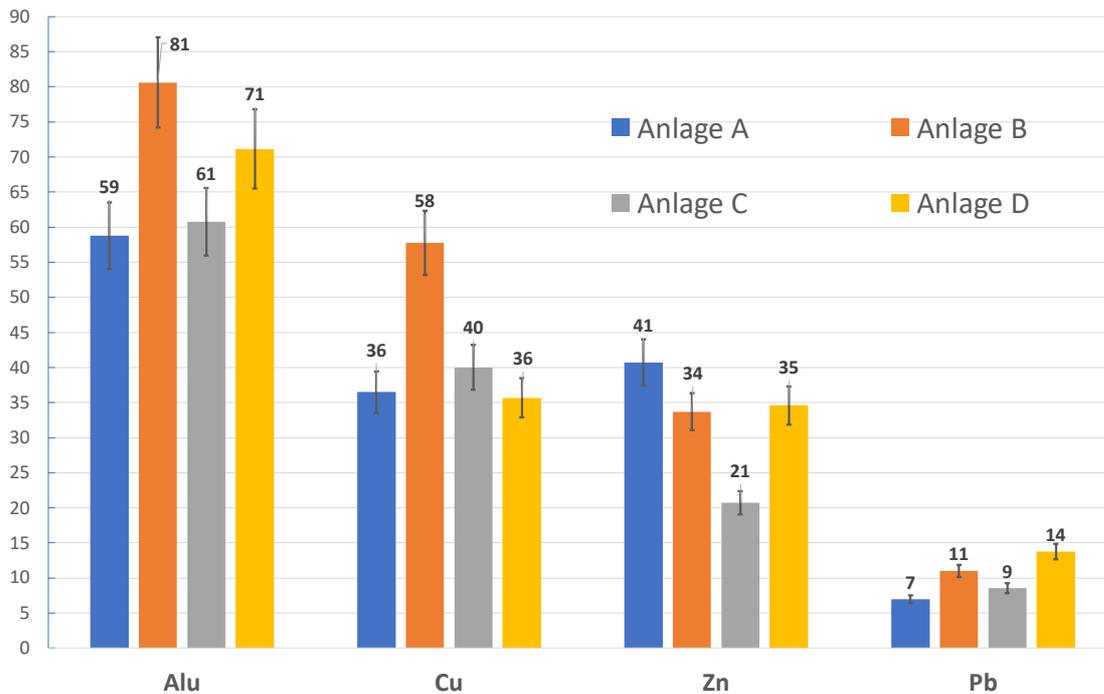


Abb 4.11. Effizienz der Metallrückgewinnung als prozentualer Anteil der rückgewonnenen Metalle der 4 Anlagen in Bezug auf die Metallgehalte der Inputschlacken (ohne separat abgeschiedene Stoffströme wie Eisen, Kupferspulen etc.).

Bei **Aluminium** zeigt Anlage B die deutlich beste Performance, bei Anlage D sind es immer noch 71%. Diese Anlage hat das höchste Potential, deren Restschlacken weisen aber auch die höchsten Alu-Gehalte auf. Hier müsste abgeklärt werden, ob dies auf den trockenen Austrag zurückzuführen ist. Es wird vermutet, dass der Kontakt mit Wasser (sehr hohe pH-Werte führt zur Hydrolyse von Al^0) v.a. sehr feinkörniges Aluminium oxidiert, was die Aluminium-Gehalte in den nass aufbereiteten und/oder gelagerten Restschlacken herabsetzt.

Beim **Kupfer** sticht ebenfalls Anlage B heraus. Die intensive mechanische Bearbeitung der Schlacken legt die v.a. duktilen Cu-haltigen Partikel für die Abscheidung sehr effizient frei und führt sie nicht in die Restschlacke über. Die Anlage C performed auch gut, bei Kupfer scheint die Zwischenlagerung keinen negativen Einfluss auf die Rückgewinnung zu haben.

Bei **Zink** zeigt Anlage A die höchste Effizienz, obwohl diese Schlacke das kleinste Potential aufweist. Es ist denkbar, dass die Behandlung der elektrodynamischen Fragmentierung Zn-haltige Legierungen bevorzugt freilegt. Anlage C fällt bei der Zink-Rückgewinnung ab. Da die Frachten in den Schlacken der Anlagen B, C und D (Abb. 4.9. unten) praktisch identisch sind, könnte dies mit Alterationen von Zn-haltigen Anteilen in der zwischengelagerten Inputschlacke zusammenhängen.

Bei **Blei** ist die Effizienz bei allen Anlagen sehr tief (<15%) und deshalb schwierig zu interpretieren. Die Anlage D schneidet hier am besten ab, es ist denkbar, dass die trockene Aufbereitung das sehr duktile Blei schonender abtrennt.

5. Fazit und Diskussion

Alle Aufbereitungsanlagen produzieren Schlackenqualitäten, welche die gesetzlichen Auflagen zum Restmetallgehalt erfüllen.

Bei den Q1-Metallfraktionen zeigten sich grosse Unterschiede in der Menge der anhaftenden Schlackenanteile. Die trockene Aufbereitung und die „nasse“ elektrodynamische Fragmentierung produziert Q1-Fraktionen mit sehr geringen Anhaftungen von Schlacken, was primär mit den Einstellungen der NE-Abscheider zusammenhängt. Dies kann ein Vorteil bei der weiteren Veredelung (Aufschmelzung) oder dem direkten Verkauf der Q1-Fraktionen (Transport) darstellen. Bei der hier durchgeführten Veredelung hat der Anteil an Schlacken in den Q1-Fraktionen kaum Einfluss auf die weitere Verarbeitung.

Betrachtet man die Rückgewinnungsraten in Bezug auf die Gesamtgehalte der Inputschlacken wird deutlich, dass Verfahren mit intensiver mechanischer Aufbereitung in Kombination mit einer weniger selektiven Q1-Metallabscheidung, sehr effizient arbeiten. Auch die intensive trockene Aufbereitung ist effizient und produziert sehr schlackenarme Fraktionen.

In Bezug auf die Effizienz der Metallrückgewinnung stellt ein höherer Schlackenanteil in den Q1-Metallen kein Nachteil dar, dürfte aber mit einem höheren Aufwand bei der Veredelung und der Entsorgung verbunden sein. Dieser Einfluss müsste im Rahmen einer Ökobilanz geklärt werden, wie auch die Fragen was den Export von „Schlackenbestandteilen“ betrifft.

Bei **Anlage A** dürfte ein nicht ausgeschöpftes Potential bei den feinkörnigen Fraktionen (<2mm) bestehen. Obwohl bei der Veredelung auf der supersort[®]metall der DHZ die Korngrößenverteilung der Metalle verändert wird, zeigt sich bereits bei der Auswertung dieser Fraktionen (Abb. 4.5.), dass die Anteile der feinkörnigen Fraktionen sowohl bei den NE-schwer wie auch bei den NE-leicht geringer als bei den anderen Anlagen sind. Im Gegenzug führt dies bei der Rückgewinnung von feinkörnigen NE-leicht Fraktionen zu sehr guten Werten. Optisch zeigen die veredelten Fraktionen die am wenigsten oxidierten Oberflächen, was auf eine gute Freilegung der Metalle zurückzuführen ist.

Die **Anlage B** zeigt die geringsten Metallanteile in den Q1-Chargen aber durchwegs sehr gute Rückgewinnungsraten. Die mechanische Beanspruchung bewirkt eine effiziente Freilegung der Metalle und zusammen mit dem verwendeten Trennschnitt führt dies zu hohen Anteilen in den feinkörnigen NE-Fraktionen. Bei der Aufbereitung durch die supersort^{metall} führen die hohen Schlackenanteile zu vergleichsweise hohen Metallfrachten in den R2-Schlacken, die absoluten Konzentrationen sind aber durch den „Verdünnungseffekt“ vergleichsweise tief und ihr Beitrag zum „Gesamtverlust“ ist ebenfalls sehr klein. Die Anlage zeigt für Cu und Zn die höchste Effizienz.

Anlage C bewegt sich in Bezug auf das Metallpotential der Inputschlacken und der Effizienz in einem durchschnittlichen Bereich. Die Inputschlacken weisen allerdings die deutlich tiefsten Aluminiumgehalte auf. Es ist anzunehmen, dass die Effizienz von mechanischen Anlagen bei tieferen Gehalten abnimmt. Ob die tiefen Aluminiumgehalte mit der Oxidation bei der Zwischenlagerung zusammenhängt oder auf die vorgängige Abscheidung der Metalle (FE, NE, Edelstahl und CuFe) bei der KVA zurückzuführen ist, bleibt offen. Die Effizienz der Kupferrückgewinnung ist sehr gut, die von Zink hingegen vergleichsweise gering. Die Gesamtgehalte an Zn sind allerdings auch sehr tief und Zn dürfte von den vier Metallen den höchsten Anteil aufweisen, welcher nicht-metallisch gebunden vorliegt.

Die Inputschlacke der **Anlage D** zeigt das grösste Metallpotential für Kupfer und Aluminium. Die Anlage arbeitet sehr effizient bei Aluminium, Blei und Zink. Die Metallgehalte von Kupfer in den R2-Schlacken sind vergleichsweise sehr hoch und in der R1-Schlacke hoch, was zu einer entsprechend tieferen Effizienz führt. Trocken aufbereitete Metalle scheinen bei der mechanischen Veredelung mehr Abrieb zu produzieren, ihr

Beitrag zum Gesamtverlust von Kupfer ist wegen der geringen Menge der R2-Schlacken aber sehr klein (Abb. 4.8.). Der wesentliche Beitrag zum „Verlust“ von Kupfer resultiert deshalb aus der R1-Schlacke. Hier könnte ein etwas weniger scharfer Trennschnitt die Kupfergehalte möglicherweise senken, was mit einem höheren R2-Schlackenanteil verbunden wäre.

Obwohl alle Anlagen technisch sehr ausgereift sind und kompetent betrieben werden, werden immer noch insgesamt etwa 50% der bilanzierten Metalle mit den "abgereicherten" Schlacken ungenutzt auf Deponien Typ D abgelagert und diese stellen dort ein grosses Schadstoffpotential für die Umwelt dar, auch wenn das Freisetzungspotential, welches über Eluattests ermittelt wurde, limitiert ist (siehe Anhang B).

Alle Schlacken wurden unter ähnlichen Verbrennungsbedingungen gebildet und deshalb dürfte auch die Form bzw. die Verteilung der nicht metallisch vorliegenden Metalle von Cu, Zn und Pb in einer ähnlichen Grössenordnung vorliegen. Die Verteilung zwischen den metallischen und oxidierten Spezies von Cu, Zn und Pb wurde hier nicht bestimmt und müsste in weiteren Untersuchungen geklärt werden. Ob diese Kenntnisse allerdings dazu beitragen, mehr zur Rückgewinnung von verbleibenden metallisch vorliegenden Partikeln zu erfahren, bleibt fraglich, solange man keine Kenntnisse zur Korngrössenverteilung dieser Partikel bis in den μm -Bereich erarbeitet. Im Weiteren müsste man die Anteile der Bindungsformen der oxidischen Metalle kennen (Silikate, Karbonate, Oxide, Sulfate) um genauere Prognosen über die Metallfreisetzung auf der Deponie stellen zu können.

Die Anlagenplaner und Betreiber loten die Grenzen der mechanischen Aufbereitung und die damit verbundenen Aufwände kontinuierlich aus. Die Erweiterung des Korngrössenbereichs unter 2mm scheint aber sinnvoll und tragbar zu sein, wie die Auswertung der 4 Anlagen zeigt.

Auf ein Rating der Anlagen wurde bereits bei der Projektplanung bewusst verzichtet. Dazu müsste eine Ökobilanz der Aufbereitung und aller Stoffströme sowie eine Kostenrechnung erarbeitet werden. Die vorliegende Studie in Kombination mit dem Freisetzungsverhalten der Schlacken (*Anhang B*) bildet dazu eine wichtige Grundlage.

6. Anhang A . Konzepte und Bilanzen

Inhaltsverzeichnis

6. Anhang A . Konzepte und Bilanzen.....	23
6.1. Probenahmekonzept Anlage A	24
6.2. Probenahmekonzept Anlage B	26
6.3. Probenahmekonzept Anlage C	29
6.4. Probenahmekonzept Anlage D	31
6.5. Probenahme Q2 und Analytikprogramm	33
6.6. Massenbilanzen Q1	38
6.7. Restmetallbestimmung	40
6.8. Massenbilanzen Q2	41

6.1. Probenahmekonzept Anlage A

1. Beprobungszeitraum

Start Probenahme	KW 22 (31.05.2021)
Ende Probenahme	KW 29 (23.07.2021)
Probenahme	Montag bis Freitag

2. Stoffströme

Metalle						
Bezeichnung	Fraktion	Beschreibung	Gesamtmenge	Menge pro Tag	Beprobungsart	
1 NEF-A	NE-Misch 2-40 mm	NE-Mischfraktion 2-10 und 10-40 mm	80-100 t	ca. 2 t	kontinuierliches Sammeln	
2 NEG-A	NE-Misch >40 mm	Gesamze NE-Mischfraktion >40 mm			keine Beprobung/Wägen	
3 FEF-A	FE-Schrott 2-40 mm	Eisenschrott fein			keine Beprobung/Wägen	
4 FEG-A	FE-Schrott >40 mm	Eisenschrott grob			keine Beprobung/Wägen	
Restschlacke						
Bezeichnung	Fraktion	Beschreibung	Gesamtmenge	Zeit/Menge pro Tag	Beprobungsart	
5 R1F-A	Restschlacke <2mm	Restschlacke <2 mm trocken (60%), Restschlacke <2 mm nass /FK (40%)		1 x Woche 2 x 30kg	Jeden Dienstag Mischproben separat	
6 R1G-A	Restschlacke 2-40 mm	Restschlacke 2-10 und 10-40 mm		1-2 Min gleichzeitig 2- 10 und 10-40	2x pro Tag Inkremente	
7 R1I-A	Restschlacke Inert	Glas, Keramik		1-2 Min	2x pro Tag Inkremente	
Total R1-A			1 t	ca. 15 kg		

3. Details zur Probenahmekampagne

Beprobung:

- Die gesamte **NE-Mischfraktion** 2-40 mm (NEF-A) wird in Mulden gesammelt und am Ende der Beprobungszeit zur DHZ nach Oberglatt geliefert. Die Verteilung der 2-10 und 10-40 mm wird stichprobenartig über Inkremente bestimmt. Die restlichen drei Metallfraktionen werden nicht beprobt. Die Zusammensetzung wird abgeschätzt und beim Abführen gewogen.
- Bei den Restschlacken (R1) fallen 3 Fraktionen an:
 - Die Fraktionen <2mm (trocken und nass) werden jeden Dienstag separat über die Waage des Dumpers gewogen und es wird je eine 25kg Mischprobe (nass + trocken) genommen.
 - Die Fraktion 2-40mm wird 2x täglich inkrementell (1-2 Min) gesammelt.
 - Die inerte Fraktion (Glas/Keramik) wird 2x täglich inkrementell (1-2 Min) gesammelt.

Wenn zu einem Probenahmezeitpunkt kein Material aufbereitet wird, entfällt die Probenahme und wird nicht nachgeholt. Die Wassergehalte der drei Restschlackenfraktionen (4 Proben) werden durch die UniBE bestimmt. Nach der Beprobung wird vor Ort durch die UniBE eine Mischprobe erstellt.

Gewichtserfassung:

- Während der gesamten Probenahmekampagne werden die Gewichte aller Stoffströme durch den Wägemeister erfasst. Herr Brühlhart hat das System auf die Bedürfnisse des Projekts angepasst und legt die Daten im Excel-Format ab (DropBox) oder übermittelt diese per Email.
- Bei der Restschlacke <2 mm wird das Gewicht der trockenen und nassen Fraktion separat erfasst.

Wassergehalt:

- Alle Wassergehalte werden durch die UniBE bestimmt.

Fotodokumentation:

- Die nicht beprobten Metallströme (NE-Mischfraktion >40 mm, Eisenfraktionen) werden 2x pro Woche fotografiert.

Fotos der diversen Stoffströme:



1 NE-Mischfraktion 2-40 mm



2 NE-Mischfraktion >40 mm



3+4 FE-Schrott fein und grob



5 Restschlacke <2 mm



6 Restschlacke 2-40 mm



7 Restschlacke Inert

6.2. Probenahmekonzept Anlage B

1. Beprobungszeitraum

Start Probenahme	ca. KW 27
Ende Probenahme	ca. KW 29
Probenahme	Montag bis Freitag, ca. 15 Arbeitstage

2. Stoffströme

Metalle					
Bezeichnung	Fraktion	Beschreibung	Erfassung	Menge pro Tag	Beprobungsart
1 NEF-B	NE-Misch <5 mm	NE-Mischfraktion <5 mm	Dumper-Waage		kontinuierliches Sammeln
2 NEM-B	NE-Misch 5-40 mm	NE-Mischfraktion 5-40 mm	Dumper-Waage		kontinuierliches Sammeln
3 NEG-B	NE-Misch 40-200 mm	NE-Mischfraktion >40 mm	Dumper-Waage		keine Beprobung/Wägen
4 FEF-B	FE-Schrott <5 mm	Eisenschrott + Batterien	Dumper-Waage		keine Beprobung/Wägen
5 FEM-B	FE-Schrott 5-40 mm	Eisenschrott mittel	Dumper-Waage		keine Beprobung/Wägen
6 FEG-B	FE-Schrott >40 mm	Eisenschrott grob	Dumper-Waage		keine Beprobung/Wägen
7 VAG-B	VA Stahl <40mm	VA Stahl 2x täglich über Rücklauf	Dumper-Waage		keine Beprobung/Wägen
8A HCU-B	Handlese	Kupferspulen	Mulde		keine Beprobung/Wägen
8B HVA-B	Handlese	VA-Stahl	Mulde		keine Beprobung/Wägen
8C HCO-B	Handlese	Organik inkl. 2 Windsichter	Mulde		keine Beprobung/Wägen
8D HIN-B	Handlese	Inerte Mineralik	Mulde		keine Beprobung/Wägen

Restschlacke					
Bezeichnung	Fraktion	Beschreibung	Gesamtmenge	Zeit/Menge pro Tag	Beprobungsart
9 R1T-B	Restschlacke <5 mm	Gesamte R1 Schlacke vom Band	Total 80kg pro Tag	1-2? Min 2-3x pro Tag	Inkremente

3. Details zur Probenahmekampagne

Beprobung:

- Die zwei **NE-Metallfraktionen <5 mm (NEF-B) und 5-40 mm (NEG-B)** werden regelmässig vom Abwurf in eine Box überführt. Dabei wird das Gewicht mit der Waage im Dumper von beiden Fraktionen separat erfasst und notiert. Die gesamten Mengen verbleiben in einer Boxe und werden am Ende der Beprobungszeit zur DHZ nach Oberglatt geliefert. Die Verteilung der 2-10 und 10-40 mm wird damit direkt erfasst.
- Die restlichen 6 Metallfraktionen werden nicht beprobt. Die Zusammensetzung wird abgeschätzt und beim Abführen gewogen.
- Bei den Restschlacken (R1) fällt nur 1 Fraktion an:
 - Die R1-Fraktion <5 mm wird über das Transportband direkt zur Deponie geführt.
 - Beim Übergang von der Anlage zum Transportband wird der Abwurf so angepasst, dass mit einem Auffanggefäss der gesamte Strom erfasst wird.
 - Es werden mindestens 2x pro Tag Stichproben entnommen und gewogen. Pro Tag sollten ca. 80 kg Restschlacke entnommen werden.
 - Die Proben werden in einem abgedeckten Container gesammelt.

Wenn zu einem Probenahmezeitpunkt kein Material aufbereitet wird, entfällt die Probenahme und wird nicht nachgeholt. Die Wassergehalte wird durch die UniBE bestimmt. Nach der Beprobung wird vor Ort durch die UniBE eine Mischprobe erstellt.

Fotos von diversen Stoffströmen:



1 NE-Mischfraktion <5 mm und 5-40 mm



4 NE-Mischfraktion >40 mm



4 & 5 FE-Schrott fein und grob



9 Abwurf Restschlacke

6.3. Probenahmekonzept Anlage C

1. Beprobungszeitraum

Start Probenahme	KW42 18.10.2021
Ende Probenahme	KW43
Betrieb der Anlage	Montag bis Freitag, à 10 Stunden
Dauer	ca. 8 Arbeitstage

2. Stoffströme

Metalle (+Leichtgut)					
	Bezeichnung	Fraktion	Beschreibung	Erfassung	Beprobungsart
1	NEF-C	NE-Misch 0-3 mm	NE-Mischfraktion <3 mm zu NE-Mix C	Container Waage	kontinuierliches Sammeln
2	NEK-C	NE-Misch 3-10 mm	NE-Mischfraktion 3-10 mm zu NE-Mix C	Container Waage	kontinuierliches Sammeln
3	NEM-C	NE-Misch 10-40 mm	NE-Mischfraktion 10-40 mm zu NE-Mix C	Container Waage	kontinuierliches Sammeln
4	NEG-C	NE-Misch >40 mm	NE-Mischfraktion >40 mm zu NE-Mix C	Radlader-Waage	keine Beprobung/Wägen
5	FEM-C	FE-Schrott 3-40 mm	Eisenschrott mittel	Radlader-Waage	keine Beprobung/Wägen
6	FEG-C	FE-Schrott >40 mm	Eisenschrott grob	Radlader-Waage	keine Beprobung/Wägen
7	VAG-C	VA Stahl Total	VA Stahl alle Korngrößen	Container + Radlager	keine Beprobung/Wägen
8	HCU-C	Kupferspulen	Kupferspulen / Meatballs	Container	keine Beprobung/Wägen
9	HCO-C	Organik / Leichtgut	Windsichter + Handlese	Container	keine Beprobung/Wägen
Restschlacke R1					
	Bezeichnung	Fraktion	Beschreibung	Gesamtmenge	Beprobungsart
10	R1T-C	Restschlacke auf Deponie	Gesamte R1 Schlacke; Erfassung über Bandwaage und über Aufgabe	Total ca. 700t pro Tag	Inkremete in Mulde ca. 7 Sec. (136kg) 2 x pro Tag

3. Details zur Probenahmekampagne

Beprobung:

- Die 3 **NE-Metallfraktionen (NEF-C, NEK-C, NEM-C)** werden in beschriftete Container abgeworfen (siehe Foto). Die Gewichte werden beim Abführen einzeln erfasst und die drei Fraktionen werden in einer überdeckten Box gelagert. Die Gesamtmenge (ca. 100t) wird am Ende der Beprobungszeit zur DHZ nach Oberglatt geliefert. Die Verteilung der drei Fraktionen ist über die Erfassung bekannt.
- Die restlichen 5 Metallfraktionen und die Leichtfraktion werden nicht beprobt. Die Zusammensetzung wird abgeschätzt und beim Abführen gewogen.
- Bei den Restschlacken (R1) fällt nur 1 Fraktion an:
 - Die R1-Fraktion wird über das Transportband aus der Halle geführt.
 - Beim Abwurf vom Transportband wird 2 x pro Tag mit einem Radlader für jeweils 7 Sekunden eine Stichprobe entnommen und in einem Container gelagert. Die Zeiten am Vor- und Nachmittag werden zufällig gewählt. Der Container wird nach der Probenahme mit einer Plane abgedeckt oder überdacht gelagert.
 - Pro Stichprobe fällt ca. 130-140 kg R1 Schlacke an. Bei 8 Tagen insgesamt ca. 2.2 Tonnen.
 - Die Proben werden in einem abgedeckten Container gesammelt.
 - Nach der Beprobung wird vor Ort eine Mischprobe durch die UniBE erstellt und die Proben für die Restmetallbestimmung, die Analytik der R1 Probe und die Rückstellung hergestellt.

Wenn zu einem Probenahmezeitpunkt kein Material aufbereitet wird, entfällt die Probenahme und wird nicht nachgeholt.

Pro Tag wird zusätzlich eine 5 Liter Probe vor dem Abwurf (vor der Befeuchtung!) mit einem Kübel entnommen und verschlossen (Bestimmung Wassergehalt). Die 5.5L Kübel werden von der UniBE beschriftet bereit gestellt.

Daten- und Gewichtserfassung:

Beim Start der Kampagne sind alle Container leer und es wird im Erfassungssystem eine eindeutige Codierung erstellt.

Während der gesamten Probenahmekampagne werden die Gewichte aller Stoffströme erfasst.

- Die Aufgabe der Schlacke in die Anlage wird von einer Dumperwaage erfasst.
- Die Abführung der entschlackten Restschlacke wird über eine Bandwaage erfasst.
- Alle anderen Fraktionen werden beim Ausfahren der Container oder über die Waage des Dumpers bei der Überführung in die Boxen erfasst.

Die DHZ erfasst alle Gewichte automatisch und stellt diese der UniBE am Ende jedes Tages per Email zur Verfügung.

Wassergehalt:

- Alle Wassergehalte werden durch die UniBE bestimmt. Daraus wird ein Mittelwert für die Massenbilanz erstellt.

Fotodokumentation:

- Die nicht beprobten Metallströme (NE-Mischfraktion >40 mm, Eisenfraktionen) werden regelmässig fotografiert.

4. Probenahmedokumentation

Für alle Stoffströme in der Tabelle oben werden die Wägeprotokolle hinterlegt.

Die Entnahmen der Stichproben werden gem. Tabelle im Anhang dokumentiert.

Die Entnahmen der Stichproben für die Bestimmung des Wassergehaltes werden dokumentiert.

Die Aufbereitung wird durch die UniBE begleitet und mit Fotos dokumentiert.



Containersystem für die Sammlung und Erfassung

5. Anhang – Tabellen (1+2) für die Probenahmezeiten:

6.4. Probenahmekonzept Anlage D

1. Beprobungszeitraum

Start Probenahme	KW44
Ende Probenahme	KW46
Probenahme	Montag bis Freitag, ca. 15 Arbeitstage

2. Stoffströme

Metalle (+Leichtgut)					
	Bezeichnung	Fraktion	Beschreibung	Erfassung	Beprobungsart
1	NEF-D	NE-Misch <15 mm	NE-Mischfraktion <15 mm zu NE-Mix D	Container	kontinuierliches Sammeln
2	NEM-D	NE-Misch 15-30 mm	NE-Mischfraktion 15-30 mm zu NE-Mix D	Container	kontinuierliches Sammeln
3	NEG-D	NE-Misch 30-80 mm	NE-Mischfraktion 30-80 mm zu NE-Mix D ca. 2% von NE 0-80	Container	kontinuierliches Sammeln
4	NEL-D	NE-Misch >80 mm	NE-Mischfraktion >80 mm	Container	keine Beprobung/Wägen
5	FES-D	FE-Schrott <0.2 mm	Eisenschrott sehr fein	Radlader-Waage	keine Beprobung/Wägen
6	FEF-D	FE-Schrott 0.2-15 mm	Eisenschrott fein	Radlader-Waage	keine Beprobung/Wägen
7	FEM-D	FE-Schrott 15-30 mm	Eisenschrott mittel	Radlader-Waage	keine Beprobung/Wägen
8	FEG-D	FE-Schrott 30-80 mm	Eisenschrott grob	Radlader-Waage	keine Beprobung/Wägen
9	FEH-D	FE-Schrott >80	Eisenschrott Handlese	Container Waage	keine Beprobung/Wägen
10	VAM-D	VA Stahl 15-80 mm	VA Stahl 15-80 mm	Container	keine Beprobung/Wägen
11	VAG-D	VA Stahl > 80 mm	VA Stahl > 80 mm	Container	keine Beprobung/Wägen
12	HCU-D	Kupferspulen	Kupferspulen	Container	keine Beprobung/Wägen
13	MIN-D	Glas 15-30 mm	Glasfraktion	Container	Beprobung/Wägen
14	HCO-D	Organik / Leichtgut	Windsichter + Handlese	Container	keine Beprobung/Wägen
Restschlacke R1					
	Bezeichnung	Fraktion	Beschreibung	Gesamtmenge	Beprobungsart
15	R1S-D	Schlackenstaub <0.3mm	Anteil Staub zu R1T-D	Bandwaage/Container?	Inkremente in Mulde ca. 7 Sec. (136kg) 2 x pro Tag
16	R1F-D	Schlacke Fein 0.3-2 mm	Anteil Feinschlacke zu R1T-D	Bandwaage/Container?	Inkremente in Mulde ca. 7 Sec. (136kg) 2 x pro Tag
17	R1G-D	Schlacke Grob 2-15 mm	Anteil Grobschlacke zu R1T-D	Bandwaage/Container?	Inkremente in Mulde ca. 7 Sec. (136kg) 2 x pro Tag
18	R1M-D	Schlacke Magn. 0.3-15 mm	Anteil magnetische Schlacke zu R1T-D	Bandwaage/Container?	Inkremente in Mulde ca. 7 Sec. (136kg) 2 x pro Tag

3. Details zur Probenahmekampagne

Beprobung:

- Die drei **NE-Metallfraktionen <5 mm (NEF-D)**, **15-30 mm (NEM-B)** und **30-80 (NEG-D)** werden kontinuierlich vom Abwurf in eine Box überführt. Die Gewichte werden über die Boxen und beim Verladen auf die LKW erfasst. Ca. die Hälfte wird zur DHZ nach Oberglatt geliefert. Die Metalle >40mm werden bei der DHZ abgesiebt und eine Stichprobe wird von Hand sortiert.
- Die NE-Mischfraktion >80mm und die restlichen Fe- und VA-Metallfraktionen werden nicht beprobt. Die Zusammensetzung wird abgeschätzt und beim Abführen gewogen.
- Die **Glasfraktion** wird täglich 2x beprobt.

- Bei den Restschlacken (R1) fallen 4 Fraktionen an, diese werden 2x pro Tag separat beprobt:
 - Die R1-Fraktion **Schlackenstaub** <0.3 mm und die
 - aufbereitete **Feinschlacke** 0.3-2mm und die
 - **Grobschlacke** 2-15 mm werden bei den Sammelförderbändern, die zu den Becherwerken führen, mit einem Sammelgefäß unter die Einmündung beprobt. Die Sammeldauer soll unabhängig von der Fördermenge bei jeder Probenahme gleich sein. Entscheidend ist, dass der gesamte Materialstrom erfasst wird und das Sammelgefäß rasch in den Strom ein- und aus-geführt wird. Wenn beide Linien in Betrieb sind, werden bei beiden Einmündungen beprobt.
 - Die **magnetische Schlacke** wird am Ende des Sammel-Förderbandes beprobt. Dazu wird der eigens angefertigte Probenehmer durch die Luke in die Staubkapselung eingeführt und mit dem Sammelgefäß der herabfallende Materialstrom durchfahren. Beim Herausführen des Probenehmers aus der Staubkapselung soll kein Probenmaterial verschüttet werden.
- Es werden mindestens 2x pro Tag Stichproben entnommen und gewogen. Pro Tag sollten total ca. 80 kg Restschlacke entnommen werden um eine Gesamtprobe von ca. 1 Tonne zu erhalten.
- Die 4 Fraktionen werden separat in abgedeckten Gebinde gesammelt und entsprechend der ausgewogenen Anteile der Gesamtströme zur Probe R1T-D (Total) gemischt.
- Es wird nicht auf TS zurückgerechnet, da man davon ausgehen kann, dass die Unterschiede im Wassergehalt sehr gering sind - geringer als die Unsicherheit bei der Bestimmung des Wassergehalts. Der Wassergehalt wird an den Proben zur Restmetallbestimmung gemessen und für die TS Korrektur verwendet.

Gewichtserfassung:

Während der gesamten Probenahmekampagne werden die Gewichte aller Stoffströme erfasst.

Beim Start des Versuchs müssen alle Boxen leer sein – oder die Aufzeichnung auf 0 gestellt sein.

- Die Aufgabe der Schlacke wird von einer Bandwaage aufgezeichnet.
- Die Abgabe der 4 Restschlackenfraktionen wird ebenfalls über Bandwaagen erfasst.
- Alle anderen Fraktionen (Nr. 4-14) werden über die Waage des Dumpers bei der Überführung vom Abwurf in die Boxen erfasst oder bei der Abführung der LKW.

Die Protokolle der Gewichte der Bandwaagen und der Erfassung über die Waagen werden von der ZAV RE vollumfänglich zur Verfügung gestellt.

Wassergehalt:

- Die Wassergehalte werden an 3 Proben (2 Restmetallbestimmungen, 1 Totalvermahlung) von der BACHEMA gemessen.

Fotodokumentation:

- Die nicht beprobten Metallströme (NE-Mischfraktion >80 mm, Eisenfraktionen) werden 2x pro Woche fotografiert.

4. Probenahmedokumentation

Für alle Stoffströme in der Tabelle oben werden die Wägeprotokolle ausgedruckt.

Die Probenahme wird mit Fotos dokumentiert.

6.5. Probenahme Q2 und Analytikprogramm

Analytikprogramm Metall- und Restschlackenfraktionen

Probenahme

Fraktionen die nicht weiter aufbereitet werden, werden gewogen und semi-quantitativ beurteilt:

- Die Fe-Produkte werden durch Stahl-Gerlafingen qualitativ (semi-quantitativ) beurteilt (optisch und Sortierung einer Teilprobe vor Ort).
- Bei Motorenteilen/Wicklungen werden für alle Anlagen dieselben Erfahrungswerte eingesetzt.
- Andere metallhaltige Fraktionen nach Angaben der Anlagen/Abnehmer und/oder durch Handheld-XRF vor Ort.
- Mineralische Fraktionen die nicht deponiert werden, werden gem. BAFU Vollzugshilfe beprobt und chemisch wie die anderen Schlacken (R1,R2) auf die Totalchemie analysiert.
- Fallen weitere Abfälle z.B. Filterkuchen aus der ABA an, werden diese gem. BAFU RL beprobt und auf die Gesamtzusammensetzung analysiert.

Die Massen werden so genau wie möglich mit Bezug auf das Trockengewicht erfasst.

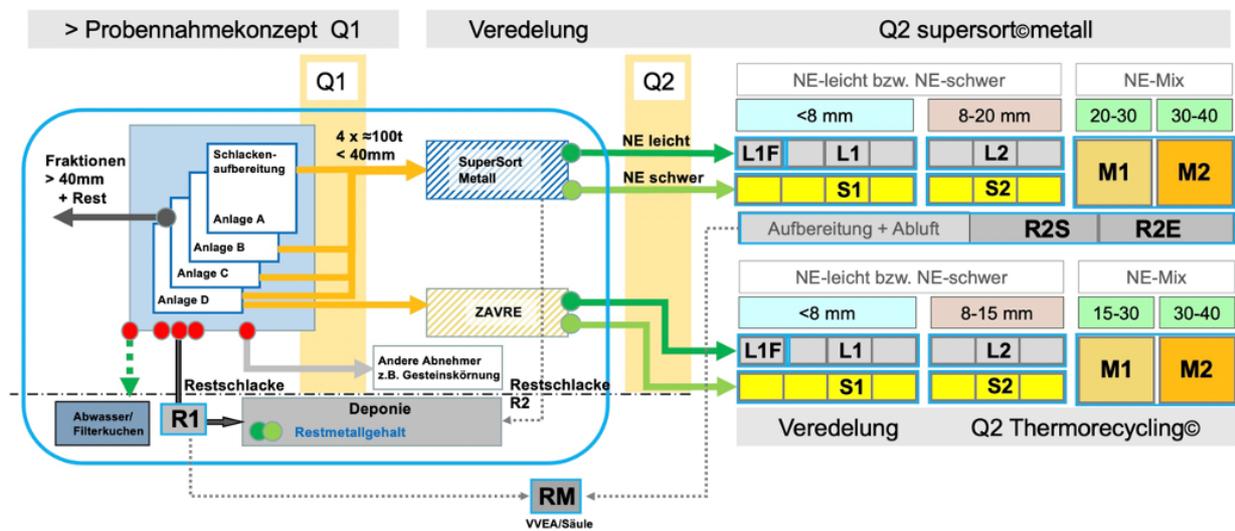


Abb 1. Schematische Darstellung der Systemgrenze und der Proben zur Analyse (blau umrahmt).

LF1 war im ursprünglichen Konzept nicht vorgesehen,

Von der Restschlacke R1 werden täglich 2 Stichproben à ca. 25kg entnommen und zu einer Mischprobe vereint. Die Probenreduktion wird gemäss BAFU Vollzugshilfe *Probenahme fester Abfälle* durchgeführt.

Auf der SuperSortMetall der DHZ fallen 7 NE-leicht, 7 NE-schwer, 2 NE-Mix und 2 Restschlacken- bzw. Stäube an.

Aus 6 NE-leicht und 7 NE-schwer werden anteilmässig je 2 Mischproben erstellt, der Trennschnitt liegt bei 8mm.

Die 7. NE-leicht Fraktion (<0.8 mm) wird separat erfasst und beprobt.

Die 2 NE-Mix Fraktionen werden separat beprobt oder anteilmässig wird 1 Mischprobe erstellt.

Die veredelten Q2-Fraktionen aus der ZAVRE werden gleichzeitig mit der Probenahme der ca. 100t Q1-Metalle entnommen. Während ca. 4 Wochen wird ein Teil der NE-Fraktionen für die Aufbereitung bei der DHZ bereitgestellt. Zeitgleich werden die Teilproben der Q2-Metalle entnommen und wie bei der DHZ zu anteilmässigen NE-Mischproben vereint:

- Die feinste NE-leicht Fraktion (0.2 - 1.2 mm) wird wie bei der DHZ separat behandelt und erfasst.
- Die NE-leicht Fraktionen werden anteilmässig gemischt: 1.2 – 8.0 (L1) und 8.0 – 15.0 mm (L2)
- Die NE-schwer Fraktionen werden anteilmässig gemischt: 0.2 – 8.0 (S1) und 8.0 – 15.0 mm (S2)
- Um die Vergleichbarkeit der Gesamtbilanzen wegen den unterschiedlichen Korngrössen der veredelten Fraktionen (15 mm bei ZAVRE, 20 mm bei DHZ) zu ermöglichen, wird eine Beprobung NE-Mix >15 durchgeführt und analysiert.

Die obere Korngrenze ist mit 15 mm nicht direkt vergleichbar mit der KG Klasse der DHZ. Dies gilt es bei der Darstellung der Resultate zu berücksichtigen. Die Anlage der ZAVRE wird z.Z. optimiert, es ist nicht absehbar ob der Siebschnitt bei 8mm bestehen bleibt. Dies beeinflusst die Gesamtmetallbilanz aber nicht.

Aus den Schlacken-/Aschencontainern wird anteilmässig 1 Mischprobe (R2) erstellt.

Für die Säulenversuche werden die R1 und R2 Proben anteilmässig gemischt.

Alle Proben werden anonymisiert beschriftet und zur Analyse gegeben.

Mischprobenherstellung und Probenmassen

Die NE-Mischproben werden als Stichproben während der gesamten Aufbereitung und Einleitung in die Bigbags entnommen.

Die entnommenen Probenmengen ergeben sich aus der Abschätzung der Korngrössen in Bezug auf die partikulären «Fremdmetalle» (NE-schwer Kontamination in NE-leicht bzw. Al-metallisch in NE-schwer).

Die R2 Proben werden ebenfalls in Form von Stichproben während der gesamten Aufbereitung entnommen und zu einer Mischprobe vereint.

Alle Teilungen werden vor Ort mittels Riffelteiler hergestellt (siehe Anhang).

Es werden von allen Proben genügende Mengen Material rückgestellt, um Wiederholungen oder Nachmessungen durchführen zu können. Die Rückstellproben werden mindestens für 6 Monate nach Abschluss des Projektes aufbewahrt.

Analysenprogramm

Die L1/L2 und S1/S2 Proben werden handsortiert und aufgeschmolzen. Die M1/M2 Proben werden handsortiert.

Die R1/R2 Restschlackenproben werden nach der aktuellen BAFU Methode auf den Restmetallgehalt untersucht und nach Totalvermahlung mit WDXRF auf die Gesamtchemie analysiert.

Die Metallbilanz wird über die Metallbestimmung erstellt, die Gesamtchemiebilanz über die Totalgehalte.

Aus den Gesamtchemiebilanzen können keine direkten Aussagen zur Gewinnbarkeit von partikulären Metallen getroffen werden, da weder die initiale Korngrösse noch ihre Bindungsform aus den Analysedaten abgeleitet werden können. Die angewendete Methode bestimmt lediglich deren Totalgehalt und kann nicht zwischen den effektiv vorliegenden Bindungsformen (metallisch, oxidisch, karbonatisch, sulfidisch, ...) unterscheiden. Lediglich bei Aluminium wird der metallische Anteil (Al₀) bestimmt, da der überwiegende Anteil von Al in Silikaten gebunden ist, was für die geochemische Beschreibung der Restschlacken eine wichtige Grösse darstellt.

Die Herstellung der Metallschmelzen und die Bestimmung der Metallausbeuten und Metallanteile wird durch ein spezialisiertes Labor in Deutschland durchgeführt (Auswahl im Anhang; Offerten sind eingetroffen).

Die Bestimmung der Handsortierung der L1/L2/S1/2 Fraktionen wird durch ein Labor in der Schweiz durchgeführt.

Die Bestimmung der M1/M2 Proben soll durch das Ingenieurbüro Skutan in einem Labor in der Schweiz durchgeführt werden.

Die Bestimmung der Restmetallgehalte nach der BAFU Methode wird durch die Bachema durchgeführt.

Die Totalchemieanalysen werden durch die UniBE durchgeführt (WDXRF z.T. Aufschluss und ICP-OES/AAS/IC)

Die Al₀ Bestimmungen werden durch Australp Sarl oder ein vergleichbares Labor in der Schweiz durchgeführt.

Die Untersuchungen der RM Fraktionen werden gemäss den Vorgaben BAFU bzw. den DIN Normen durchgeführt.

Alle Teilnehmer der Projektgruppe sind eingeladen die Labore während der Ausführung der Arbeiten zu besuchen oder zu begleiten.

Programm pro Charge

Metallfraktionen Q2

NE-leicht <8 mm					
Probe	Min. Anz. Stichpr.	Analysen-Masse	Methode	Anzahl Proben	Analyseparameter
L1	20	5	Sortieranalyse / Dichtentrennung Bestimmung Fremdanteile händisch	1	NE-leicht / NE-schwer NE, FE, VA und Mineralik
		5	Schmelzanalyse mit Bestimmung Metallausbeute und Metallanteilen	1	Alu Ausbeute (Cu, Fe, Zn, Pb,...) / Schlacke
NE-schwer <8 mm					
Probe	Min. Anz. Stichpr.	Analysen-Masse	Methode	Anzahl Proben	Analyseparameter
S1	12	5	Sortieranalyse / Dichtentrennung Bestimmung Fremdanteile händisch Bestimmung NE-schwer Metalle	1	Fraktionen für Sortierung Alu, NE, FE, VA und Mineralik Kupfer, Blei, Messing, ...
		5	Schmelzanalyse mit Bestimmung Metallausbeute und Metallanteilen	1	Cu, Zn Ausbeute (Fe, Al,...) / Schlacke + Au, Ag (nicht im ursprünglichen Konzept)
NE-leicht 8-20 mm					
Probe	Min. Anz. Stichpr.	Analysen-Masse	Methode	Anzahl Proben	Analyseparameter
L2	20	30	Sortieranalyse Bestimmung Fremdanteile händisch	1	Fraktionen für Sortierung NE, FE, VA und Mineralik
		30	Schmelzanalyse mit Bestimmung Metallausbeute und Metallanteilen	1	Alu Ausbeute (Cu, Fe, Zn, Pb,...) / Schlacke
NE-schwer 8-20 mm					
Probe	Min. Anz. Stichpr.	Analysen-Masse	Methode	Anzahl Proben	Analyseparameter
S2	12	30	Sortieranalyse Bestimmung Fremdanteile händisch Bestimmung NE-schwer Metalle	1	Fraktionen für Sortierung Alu, NE, FE, VA und Mineralik Kupfer, Blei, Messing, ...
		30	Schmelzanalyse mit Bestimmung Metallausbeute und Metallanteilen	1	Cu, Zn Ausbeute (Fe, Al,...) / Schlacke
NE-Mix 20-30 mm					
Probe	Min. Anz. Stichpr.	Analysen-Masse	Methode	Anzahl Proben	Analyseparameter
M1	6	30	Sortieranalyse	1	Alu, NE (Kupfer, Blei, Messing,...), FE, VA und Mineralik
NE-Mix 30-40 mm					
Probe	Min. Anz. Stichpr.	Analysen-Masse	Methode	Anzahl Proben	Analyseparameter
M2	3	60	Sortieranalyse	1	Alu, NE (Kupfer, Blei, Messing,...), FE, VA und Mineralik

*sortierte Probe = Rückstellprobe

Restschlacken R1/R2/RM

Probe	Min. Anz. Stichpr.	Analysen-Masse	Methode	Anzahl Proben	Analyseparameter
R1	60	50	Restmetallbestimmung BAFU 2-16	1	Siebanalyse <1/ 1-2 / 2-8 / 8-16 mm
			Sortieranalyse		
			Totalvermahlung Gesamtprobe		
Probe	Min. Anz. Stichpr.	Analysen-Masse	Methode	Anzahl Proben	Analyseparameter
R2	10 pro Container	15	Restmetallbestimmung BAFU 2-16	1	Siebanalyse <1/ 1-2 / 2-8 / 8-16 mm
			Sortieranalyse		
			Totalvermahlung Gesamtprobe/Restschlacke		
Probe	Min. Anz. Stichpr.	Analysen-Masse	Methode	Anzahl Proben	Analyseparameter
RM	Mischung R1+R2	2	Eluattest VVEA	1	Standardprogramm Test 1+2
			Säulentest CEN TS14405	1	Elemente gemäss Standardprogramm VVEA

Tab1 Probenmassen und Analyseparameter (in grau: abweichend zum ursprünglichen Konzept)

Grundlagen Anzahl Stickproben / Probenmassen

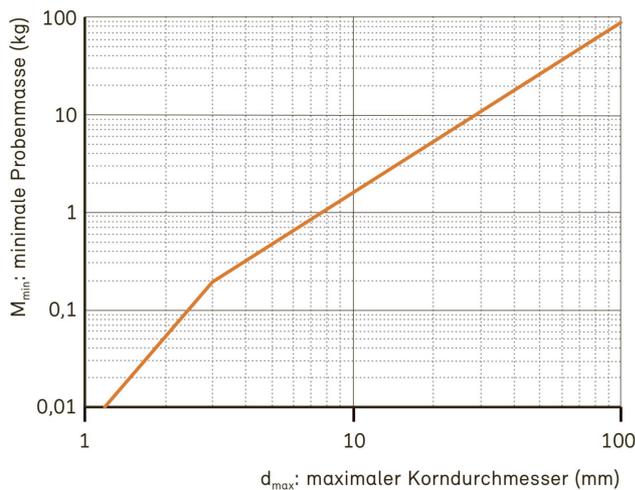
Abschätzung minimale Probenmasse

Annahmen:

- Die Verunreinigungen sind partikulär
- Für die Abschätzung wird das Metall mit einer Verunreinigung von <2% angenommen.

Probenbezeichnung	L1	L2	S1	S2	M1	M2
d-min (mm)	0.8	8	0.3	8	20	30
d-max (mm)	8	20	8	20	30	40
Matrix Metall	Al	Al	Cu	Cu	Al	Al
Verunreinigung	Cu, Ms, VA, Zn	Cu, Ms, VA, Zn	Al	Al
Angenommene Konzentration (%)	<2	<2	<1	<1	50	50

Min. Probenmenge / Stichprobe (kg)	1.2 / 2	5	1.2 / 2	5	10	20
Anzahl Stichproben	20	12	20	12	6	3
Proben-Masse in (kg)	40	60	40	60	60	60
Teilungen	3	1	3	1	1	0
Analysen-Masse (kg)	5	30	5	30	30	60
Mehrfache min. Probenmenge (F)	4	6	4	6	3	3



BAFU, 2019. Probenahme fester Abfälle

Angefragte Labore für Schmelzanalysen - Bestimmung Metallausbeute und Metallanteilen

Fred Schmidt GmbH: <https://www.probenahme-schmidt.com>

Günther Probenahme: <https://www.guenther-probenahme.de>

Institut für Materialprüfung Glörfeld GmbH: <https://img-labor.de>

6.6. Massenbilanzen Q1

Beprobung Stoffströme Saidef

Metalle			Gesamtbilanz Anlage nass		Bilanz <40mm nass			Bilanz <40mm @TS			
Bezeichnung	Fraktion	Beschreibung	Massen tot (t)	Anteile %	Massen <40mm (t)	Anteile <40mm %	Wassergehalt %	Massen @ TS (t)	Anteile <40mm %	NE Bilanz (%)	
1	NEF-A	NE-Misch 2-40 mm	NE-Mischfraktion 2-10 + 10-40 mm	88.078	2.88	88.078	3.00	0.72	87.443	3.44	3.44
2	NEG-A	NE-Misch >40 mm	Gesamze NE-Mischfraktion >40 mm*	8.000	0.26						
3	FE-A	FE-Schrott >2 mm	Eisenschrott total	57.920	1.89						
7	R11-A	Restschlacke Inert	Glas, Keramik	65.080	2.12						
Restschlacke											
Bezeichnung	Fraktion	Beschreibung	Massen tot (t)	Anteile %	Massen <40mm (t)	Anteile <40mm %	Wassergehalt %	Massen @ TS (t)	Anteile <40mm %	NE Bilanz (%)	
5	R1F-A	Restschlacke <2mm	Restschlacke <2 mm trocken Restschlacke <2 mm nass /FK @	1806.700	58.98	1806.700	61.61	17.0	1499.561	58.95	
6	R1G-A	Restschlacke 2-40 mm	Restschlacke 2-10 und 10-40 mm	1037.680	33.87	1037.680	35.39	7.8	956.741	37.61	
			Total	3063.458	100.00	2932.458	100.00		2543.745	100.00	
R2	R2S-A	Sichter Q2	Fraktion aus Zyklon	3.820		3.820	0.13	0.70	3.793	0.15	
R2	R2E-A	Entstauber Q2	Fraktion aus Entstauber/Abluft	13.090		13.090	0.45	4.65	12.481	0.49	0.64
										2.80	

@ Die Wassergehalte schwanken von 32-15%, nach 2 Tagen Lagerung ca. 17% - das ist konsistent mit Feuchtemessung nach der Mischung (UniBE und BACHEMA)
* Angabe gem. Jahresdurchschnitt

Beprobung Stoffströme Elbisgraben

Metalle			Gesamtbilanz Anlage nass		Bilanz <40mm nass			Bilanz <40mm @TS			
Bezeichnung	Fraktion	Beschreibung	Massen tot (t)	Anteile %	Massen <40mm (t)	Anteile <40mm %	Wassergehalt %	Massen @ TS (t)	Anteile <40mm %	NE Bilanz (%)	
1	NEF-B	NE-Misch <5 mm	NE-Mischfraktion <5 mm	66.900	3.78	66.900	4.31	1.34	66.001	4.75	
2	NEM-B	NE-Misch 5-40 mm	NE-Mischfraktion 5-40 mm	44.200	2.50	44.200	2.85	1.34	43.606	3.14	7.89
3	NEG-B	NE-Misch 40-200 mm	NE-Mischfraktion >40 mm	5.250	0.30						
4	FEF-B	FE-Schrott <5 mm	Eisenschrott + Batterien	34.950	1.97						
5	FEM-B	FE-Schrott 5-40 mm	Eisenschrott mittel	50.050	2.83						
6	FEG-B	FE-Schrott >40 mm	Eisenschrott grob	54.950	3.10						
7	VAG-B	VA Stahl <40mm	VA Stahl 2x täglich über Rücklauf	4.060	0.23						
8A	HCU-B	Handlese Cu-Spulen	Kupferspulen	2.480	0.14						
8B	HVA-B	Handlese VA	VA-Stahl	16.940	0.96						
8C	HCO-B	Handlese Organik	Organik inkl. 2 Windsichter	0.940	0.05						
8D	HIN-B	Handlese Mineralik	Inerte Mineralik	49.850	2.82						
Restschlacke											
Bezeichnung	Fraktion	Beschreibung	Massen tot (t)	Anteile %	Massen <40mm (t)	Anteile <40mm %	Wassergehalt %	Massen @ TS (t)	Anteile <40mm %	NE Bilanz (%)	
9	R1T-B	Restschlacke <5 mm	Gesamte R1 Schlacke vom Band	1440.000	81.33	1440.000	92.84	11.17	1279.152	92.11	
			Total	1770.570	100.00	1551.100	100.00		1388.759	100.00	
R2	R2S-B	Sichter Q2	Fraktion aus Zyklon	29.320		29.320	1.89	0.81	29.083	2.09	
R2	R2E-B	Entstauber Q2	Fraktion aus Entstauber/Abluft	29.330		29.330	1.89	4.28	28.075	2.02	4.12
										3.78	

Beprobung Stoffströme Lufingen											
Metalle (+Leichtgut)			Gesamtbilanz Anlage nass			Bilanz <40mm nass			Bilanz <40mm @TS		
Bezeichnung	Fraktion	Beschreibung	Massen tot (t)	Anteile %	Massen <40mm (t)	Anteile <40mm %	Wassergehalt %	Massen @ TS (t)	Anteile <40mm %	NE Bilanz (%)	
1	NEF-C	NE-Misch 0-3 mm	NE-Mischfraktion <3 mm	35.060	1.04	35.060	1.13	1.07	34.684	1.29	4.32
2	NEK-C	NE-Misch 3-12 mm	NE-Mischfraktion 3-12 mm	37.040	1.10	37.040	1.20	1.07	36.643	1.36	
3	NEM-C	NE-Misch 12-40 mm	NE-Mischfraktion 12-40 mm	45.460	1.35	45.460	1.47	1.07	44.972	1.67	
4	NEG-C	NE-Misch >40 mm	NE-Mischfraktion >40 mm	5.420	0.16						
5	FEM-C	FE-Schrott 3-40 mm	Eisenschrott mittel	105.320	3.12						
6	FEG-C	FE-Schrott >40 mm	FE Ungesiebt ab SuSo	150.660	4.46						
7	VAG-C	VA Stahl Total	VA Stahl alle Korngrößen	6.000	0.18						
8	HCU-C	Kupferspulen	Kupferspulen / Meatballs	1.460	0.04						
9	HCO-C	Organik / Leichtgut	Windsichter + Handlese	11.040	0.33						
Restschlacke R1											
Bezeichnung	Fraktion	Beschreibung	Massen tot (t)	Anteile %	Massen <40mm (t)	Anteile <40mm %	Wassergehalt %	Massen @ TS (t)	Anteile <40mm %	NE Bilanz (%)	
10	R1T-C	Restschlacke auf Deponie	Gesamte R1 Schlacke; Erfassung über Bandwaage und über Aufgabe	2982.000	88.24	2982.000	96.21	13.64	2575.255	95.68	
			Total	3379.460	100.00	3099.560	100.00		2691.554	100.00	
R2	R2S-C	Sichter Q2	Fraktion aus Zyklon	22.420		22.420	0.72	4.20	21.478	0.80	
R2	R2E-C	Entstauber Q2	Fraktion aus Entstauber/Abluft	35.850		35.850	1.16	0.89	35.531	1.32	2.12
											2.20

Beprobung Stoffströme ZAVRE											
Metalle (+Leichtgut)			Gesamtbilanz Anlage nass			Bilanz <40mm nass			Bilanz <40mm @TS		
Bezeichnung	Fraktion	Beschreibung	Massen tot (t)	Anteile %	Massen <40mm (t)	Anteile <40mm %	Wassergehalt %	Massen @ TS (t)	Anteile <40mm %	NE Bilanz (%)	
1	NEF-D	NE-Misch 0.2-15 mm	NE-Mischfraktion <15 mm	49.128	1.97	49.128	2.20	0.07	49.094	2.20	4.61
2	NEM-D	NE-Misch 15-30 mm	NE-Mischfraktion 15-30 mm	40.686	1.63	40.686	1.82	0.07	40.658	1.82	
3	NEG-D	NE-Misch 30-80 mm	NE-Mischfraktion 30-80 mm	13.106	0.53	13.106	0.59	0.07	13.097	0.59	
4	NEL-D	NE-Misch >80 mm	NE-Handsörtierung	0.557	0.02						
5/6	FEF-D	FE-Schrott 0.2-15 mm	Eisenschrott fein	74.260	2.98						
7	FEM-D	FE-Schrott 15-30 mm	Eisenschrott aus Sieb	7.291	0.29						
8/9	FEG-D	FE-Schrott 30-80 mm	Eisenschrott grob	163.979	6.59						
10	VAM-D	VA Stahl 15-80 mm	VA Stahl Handsörtierung	5.552	0.22						
11	VAG-D	Kupferspulen	Cu-Spulen aus Handsörtierung	0.483	0.02						
12	HCU-D	Kupfer Handsörtierung	Cu-Handsörtierung	0.186	0.01						
13	MIN-D	Glas 15-30 mm	Glasfraktion	0.851	0.03						
Restschlacke R1											
Bezeichnung	Fraktion	Beschreibung	Massen tot (t)	Anteile %	Massen <40mm (t)	Anteile <40mm %	Wassergehalt %	Massen @ TS (t)	Anteile <40mm %	NE Bilanz (%)	
15	R1T-D	Restschlacke	Mix: Staub/Fein/Grob/Magn.	2132.466	85.69	2132.466	95.40	0.10	2130.333	95.39	
			Total	2488.545	100.00	2235.386	100.00		2233.183	100.00	
R2	R2S-B	Sichter Q2	Fraktion aus Zyklon	8.180		8.180	0.37	0.10	8.172	0.37	
R2	R2E-B	Entstauber Q2	Fraktion aus Entstauber/Abluft	15.000		15.000	0.67	0.42	14.937	0.67	1.03
											3.57

6.7. Restmetallbestimmung

Restmetallbestimmung R1-Schlacken

Probenbezeichnung	R1T-A1	R1T-A2	R1T-A MW	R1T-B1	R1T-B2	R1T-B MW	R1T-C1	R1T-C2	R1T-C MW	R1T-D1	R1T-D2	R1T-D MW
Proben-Nr. Bachema	46327	46328	46329	46324	46325	46326	50475	50476	50477	59562	59563	59564
Probenparameter			Mittelwert			Mittelwert			Mittelwert			Mittelwert
Angelieferte Probemenge kg	26.2	27.1	26.65	22.8	22.8	22.8	50.1	48.1	49.1	31.8	30.8	31.3
Trockensubstanz (105→∞C) % (Bachema)	90.2	90.3	90.23	92.5	92.5	92.50	89.8	90	89.90	100	99.8	99.90
Anteil >16 mm %	8.41	7.5	7.96	<0.05	<0.05	<0.05	6.29	7.8	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
Aussortierte Anteile (nicht chemisch analysiert)												
NE Metalle 2-16 mm % TS	0.78	0.85	0.82	0.08	0.13	0.11	0.6	0.54	0.57	0.37	0.36	0.37
(BAFU-Methode F-23)												
NE Metalle 8-16 mm % TS	0.15	0.23	0.19	<0.05	<0.05	<0.05	0.17	0.1	0.14	0.09	0.08	0.09
NE Metalle 2-8 mm % TS	0.63	0.62	0.63	0.08	0.13	0.11	0.44	0.44	0.44	0.28	0.28	0.28
NE Metalle 1-2 mm % TS	0.36	0.4	0.38	0.08	0.09	0.09	0.28	0.25	0.27	0.15	0.17	0.16
FE Metalle 2-16 mm % TS	0.3	0.18	0.24	0.06	0.09	0.08	0.19	0.14	0.17	0.55	0.67	0.61
FE Metalle 8-16 mm % TS	0.11	0.08	0.10	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	0.05	0.14	0.10
FE Metalle 2-8 mm % TS	0.19	0.11	0.15	0.06	0.09	0.08	0.19	0.14	0.17	0.49	0.53	0.51
FE Metalle 1-2 mm % TS	0.05	0.05	0.05	0.02	0.02	0.02	0.11	0.06	0.09	0.12	0.1	0.11
Unverbranntes 2-16 mm % TS	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
Unverbranntes 8-16 mm % TS	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
Unverbranntes 2-8 mm % TS	0.03	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.03	0.04	<0.01	<0.01	0.01	<0.01
Unverbranntes 1-2 mm % TS	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
Allgemeine und anorganische Parameter												
Kohlenstoffgehalt (CHNS) % TS C	2.0	2.0	2.0	1.3	1.3	1.3	1.4	1.3	1.4	0.7	0.7	0.7
Kohlenstoff org. (TOC) % TS C	1.0	1.0	1.0	0.6	0.6	0.6	0.7	0.7	0.7	0.4	0.4	0.4
Kohlenstoff anorg. % TS C	1.0	1.0	1.0	0.7	0.7	0.7	0.7	0.6	0.7	0.3	0.3	0.3
Halogene / Schwefel			0			0			0			0
Schwefel (gesamt) mg/kg TS S	6'500	6'400	6450	9'300	9'200	9250	8'500	8'900	8700	6'900	7'300	7100
Elemente und Schwermetalle												
Aluminium (gesamt) ICP mg/kg TS Al	50'000	56'000	53'000	47'000	49'000	48'000	49'000	57'000	53'000	53'000	52'000	52'500
Antimon (gesamt) ICP mg/kg TS Sb	110	120	115	100	110	105	120	130	125	150	170	160
Arsen (gesamt) ICP mg/kg TS As	21	20	21	17	18	18	19	19	19	26	23	25
Blei (gesamt) ICP mg/kg TS Pb	780	910	845	1'000	1'000	1'000	1'100	1'300	1'200	1'200	1'200	1'200
Cadmium (gesamt) ICP mg/kg TS Cd	3.9	4.7	4	8.2	9.7	9	3.9	4.5	4	3.2	3	3
Chrom (gesamt) ICP mg/kg TS Cr	400	1'300	850	490	670	580	840	950	895	790	1'200	995
Eisen (gesamt) ICP mg/kg TS Fe	44'000	49'000	46'500	69'000	73'000	71'000	77'000	82'000	79'500	91'000	94'000	92'500
Kupfer (gesamt) ICP mg/kg TS Cu	3'600	6'200	4'900	3'200	3'700	3'450	4'000	5'900	4'950	7'300	8'600	7'950
Nickel (gesamt) ICP mg/kg TS Ni	170	620	395	230	320	275	420	520	470	400	640	520
Phosphor (gesamt) ICP mg/kg TS P	5'200	4'900	5'050	4'100	4'000	4'050	4'000	4'000	4'000	5'500	5'400	5'450
Zink (gesamt) ICP mg/kg TS Zn	2'700	3'100	2'900	3'400	3'400	3'400	3'500	3'800	3'650	3'900	3'800	3'850
Aluminium												
Aluminium metallisch (AlO) gew%	1.07	1.51	1.29	0.62	0.54	0.58	0.55	0.95	0.75	0.91	1.08	0.995
Aluminium metallisch (AlO) mg/kg	10'700	15'100	12'900	6'200	5'400	5'800	5'500	9'500	7'500	9'100	10'800	9'950
Aluminium O-Si-gebunden	39'300	40'900	40'100	40'800	43'600	42'200	43'500	47'500	45'500	43'900	41'200	42'550
Anteil oxidisch-silikatisch in %	79	73	75.8	87	89	87.9	89	83	86.1	83	79	81.0

6.8. Massenbilanzen Q2

Resultate Handauswertung Fraktionen >20 mm

Probe	Al massiv	Al leicht	NE schwer	VA-Stahl	Schlacke	Organisch	Feinmateial	Anteil	Tot kg
M1 A	81.74		5.52	12.70	0.00	0.03		1.73	18.792
M1 B	67.37		13.09	19.51	0.00	0.03		0.47	27.260
M1 C	71.81		9.79	18.36	0.00	0.04		1.28	35.708
M1 D	75.81		8.37	15.80	0.00	0.02		2.15	28.817

15-30 mm (>2mm)

M1 E	54.25		12.46	4.21			29.08		
------	-------	--	-------	------	--	--	-------	--	--

Probe	Al massiv	Al leicht	NE schwer	VA-Stahl	Schlacke	Organisch	Feinmateial	Anteil	Tot kg
M2 A	49.92	12.29	17.32	16.65	0.59	0.87	2.37	1.99	21.702
M2 B	31.73	2.68	29.83	28.01	0.00	4.33	3.42	0.56	16.627
M2 C	53.77	2.21	17.71	20.73	2.84	1.17	1.59	1.31	31.518
M2 D	49.71	16.30	11.30	16.20	0.75	2.68	3.05	5.02	14.260

davon >45mm:

M2.2 D	2.27	3.75		5.83					1.688
--------	------	------	--	------	--	--	--	--	-------

Berechnete chemische Zusammensetzungen 8-20mm der betreffenden Anlagen mit Mittelwert

L2	Si %	AL% Rest	Fe %	Cu %	Mn %	Mg %	Cr %	Ni %	Zn %	Pb %	Sn %	Ti %	Summe	Metall%
A	1.29	95.60	0.55	1.09	0.230	0.280	0.036	0.047	0.750	0.032	0.015	0.022	99.94	97.54
B	1.55	94.90	0.52	1.27	0.230	0.200	0.025	0.048	1.170	0.039	0.017	0.022	99.99	98.19
C	1.56	94.77	0.78	1.45	0.220	0.085	0.160	0.140	0.740	0.048	0.016	0.027	100.00	96.65
D	1.67	94.75	0.82	1.42	0.300	0.200	0.063	0.075	0.600	0.054	0.017	0.034	100.00	98.26
L2-MW	1.518	95.005	0.668	1.308	0.245	0.191	0.071	0.078	0.815	0.043	0.016	0.026	99.98	97.66

S2	Si %	AL% Rest	Fe %	Cu %	Mn %	Mg %	Cr %	Ni %	Zn %	Pb %	Sn %	Ti %	Summe	Metall%
A	<0.05	2.38	0.74	43.38	0.029			1.450	49.700	1.220	0.130		99.03	96.82
B	<0.05	1.03	0.22	62.33	0.021			1.900	32.100	1.240	0.170		99.01	98.61
C	2.150	1.73	12.20	51.54	0.150			2.430	28.090	1.630			99.92	96.04
D	3.440	2.23	12.90	40.99	0.150			2.340	36.300	1.640			99.99	96.63
S2-MW	2.795	1.843	6.515	49.560	0.088			2.030	36.548	1.433	0.150		99.49	97.03

Berechnete Metallertrag gem chemische Zusammensetzung 8-20mm der betreffenden Anlagen

Probe	Si %	AL% Rest	Fe %	Cu %	Mn %	Mg %	Cr %	Ni %	Zn %	Pb %	Sn %	Ti %
M1 A	1.395	77.762	0.905	3.803	0.205	0.156	0.058	0.175	2.683	0.114	0.022	0.021
M1 B	1.388	64.245	1.303	7.370	0.177	0.129	0.048	0.318	5.334	0.217	0.031	0.018
M1 C	1.363	68.404	1.117	5.790	0.185	0.137	0.051	0.254	4.162	0.171	0.026	0.019
M1 D	1.384	72.174	1.051	5.140	0.193	0.145	0.054	0.229	3.677	0.153	0.025	0.020

15-30 mm (>2mm)

M1 E	1.172	51.770	1.174	6.886	0.144	0.104	0.039	0.295	4.997	0.202	0.028	0.014
------	-------	--------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

Probe	Si %	AL% Rest	Fe %	Cu %	Mn %	Mg %	Cr %	Ni %	Zn %	Pb %	Sn %	Ti %
M2 A	1.428	59.422	1.543	9.395	0.168	0.119	0.044	0.400	6.836	0.275	0.036	0.016
M2 B	1.356	33.243	2.173	15.234	0.110	0.066	0.024	0.632	11.183	0.442	0.050	0.009
M2 C	1.344	53.503	1.527	9.508	0.153	0.107	0.040	0.403	6.928	0.278	0.036	0.015
M2 D	1.318	62.921	1.177	6.466	0.172	0.126	0.047	0.281	4.669	0.190	0.028	0.017

davon >45mm:

M2.2 D	0.091	5.725	0.040	0.079	0.015	0.012	0.004	0.005	0.049	0.003	0.001	0.002
--------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------



7. Anhang B - Eluatverhalten Restschlacken

MetExSlag - Eluatverhalten der Restschlacken nach der Metallrückgewinnung

Zusammenfassung

Im Vergleich zum sehr grossen Freisetzungspotential an Schwermetallen zeigen die Batchtests nach VVEA lediglich bei zwei von vier Schlacken Überschreitungen der Grenzwerte für Kupfer. Die Resultate der Säulen-Eluattests stützen diese Erkenntnisse im Wesentlichen. Die Säulentests zeigen, dass das chemische Milieu initial von Salzen und der Hydrolyse von metallischen Partikeln und dann vom Karbonatsystem gesteuert wird, welches die Löslichkeit von Metallen bei hohen pH-Werten limitiert. Dabei zeigt sich, dass der vorgängige Kontakt mit Wasser und die Dauer der Alterung den zeitlichen Verlauf der Freisetzung wesentlich beeinflusst, über den gesamten Zeitraum der Säulentests gleichen sich die Gesamtmengen der freigesetzten Metalle aber wieder stark aus.

Der Vergleich von zwei Schlacken, die mit und ohne Beimischung der R2-Stäube aus der Veredelung durchgeführt wurden, zeigte, dass die Beimischung von Schlackenstäuben wegen der Löslichkeitskontrolle des Karbonatsystems der Matrix keinen signifikanten Einfluss auf die Mobilisierung für den vom Test abgebildeten Zeitraum hat (ca. $X \cdot 100$ Jahre).

Inhaltsverzeichnis

7. Anhang B - Eluatverhalten Restschlacken	43
7.1 Einführung	44
7.2. Resultate und Diskussion	45
VVEA Tests	45
Säulentests	47
Einfluss der R2-Stäube auf die Freisetzung	50
7.3. Analysen	51
Batchversuche VVEA	51
Säulenversuche	52

7.1 Einführung

Für die Beurteilung des Freisetzungspotentials von Schwermetallen aus den vier Restschlackenfractionen wurden Batch-Eluate nach VVEA (Schweiz. Eidgenossenschaft, 2016) und genormte Säulenexperimente durchgeführt. Die Batch-Eluate nach VVEA erlauben einen Vergleich der Freisetzung mit anderen Materialien oder Schlacken zu ziehen. Für die Ablagerung von Schlacken ist kein Eluattest vorgeschrieben, dieser wurde und wird für eine Abschätzung der Metallfreisetzung aber oft durchgeführt (Glaser, 2021). Der Test erlaubt innerhalb von 24 Stunden aussagen über das Verhalten bei einem Wasser zu Feststoff-Verhältnis von 10 gegenüber schwachen Säuren (CO₂) und bei neutralen Bedingungen (H₂O) zu treffen. Der Säulentest wird ebenfalls unter vorgegeben Mengen und Fließbedingungen bis zu einem Wasser zu Feststoff-Verhältnis von 10 durchgeführt. Es wird entmineralisiertes Wasser verwendet und die Dauer beträgt ca. 27 Tage. Dieser Test bildet für die meisten Materialien die Bedingungen auf einer Deponien besser ab, insbesondere wenn die Materialien hohe Austauschkapazitäten aufweisen oder die Konzentrationen bei einem Batch Test nahe am Gleichgewicht zu einer reinen Phase (organische Schadstoffe) oder einer Festphase (anorganische Schadstoffe) liegen. Der Säulentest erlaubt es zudem zeitlich abhängige Prozesse zu erkennen wie z.B. die Auswaschung von gut löslichen Salzen, die Hydrolyse von Metallen oder die initiale Hydratisierung und Lösung von Ca-Oxiden.

Für den Vergleich der vier Anlagen wurden die Restschlacken aus der Restmetallaufbereitung (R1) und die Schlackenstäube aus der Metallveredelung (R2) entsprechend ihrem Anfall zusammengefügt. Bei zwei Schlacken (B und D) wurden bei den Säulentests ergänzend zur Mischung (R1+R2) nur die R1 Schlacken eluiert um den Einfluss des R2-Anteils aufzuzeigen.

Die Probenahme, die Probenreduktion und Aufbereitung der Schlacken und Stäube sind im Hauptbericht beschrieben. Die Batchexperimente sowie die chemischen Analysen wurden gem. Vollzugshilfe Messmethoden im Abfall- und Altlastenbereich (BAFU, 2022) und die Säulenexperimente gem. der Norm CEN/TS 14405 (2017) durchgeführt.

7.2. Resultate und Diskussion

VVEA Tests

Die pH Werte der Batchtests zeigen bei den Wassertests moderate, bei den CO₂-Tests deutlich geringere Unterschiede, was auf die kontinuierlicher Zugabe von Karbonsäure zurückzuführen ist. Die pH-Werte im Wassereluat liegen für Schlacken in der Regel bei 12 und bei CO₂ bei ca. 6. Bei den Wassertests zeigen die beiden Schlacken A und D höhere pH Werte, insbesondere die trocken ausgetragene Probe D mit 12.78.

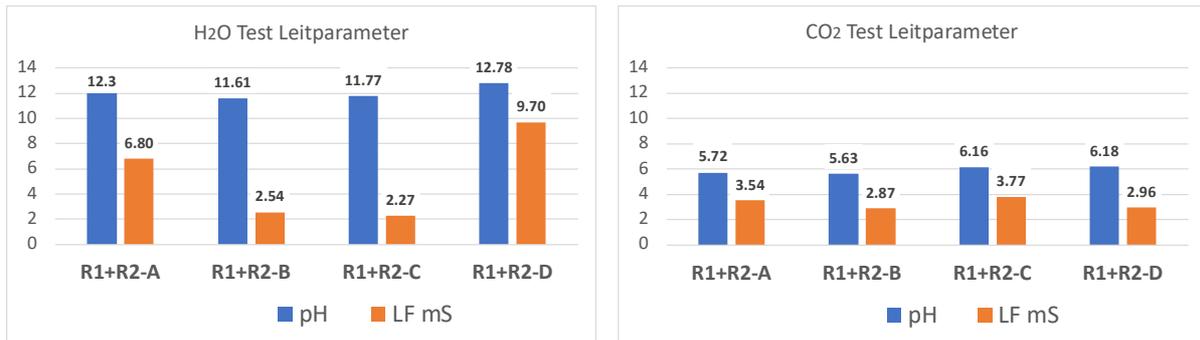


Abbildung 1: Leitparameter pH und Leitfähigkeit der Wasser- und CO₂ VVEA Tests.

Auch bei den Leitfähigkeiten (Abb. 1) sind die Unterschiede bei den CO₂ Tests relativ gering, bei Wasser hingegen deutlich grösser. Hier zeigt sich, dass die kurze Alterung bzw. der vorgängig fehlende Kontakt mit Wasser bei A bzw. D zu höheren Anteilen an gelösten Komponenten im Wasser führt, was sich u.a. bei den 2-3 fach höheren LF Werten zeigt. Für diese Unterschiede sind hauptsächlich die Reaktionen der Ca-Oxide verantwortlich, was in den deutlich höheren Ca-Gehalten bei A und C (Abb. 2) ersichtlich wird. Bei Na und K zeigen sich hingegen kaum Unterschiede in den Konzentrationen der beiden Tests da die Lösung von Salzen sehr schnell und kaum pH-abhängig ist. Die Lösung von Sulfaten (S) und Silikaten (Mg, Si) ist bei tieferen pH-Werten (CO₂) im Vergleich zum Wassertest hingegen leicht erhöht.

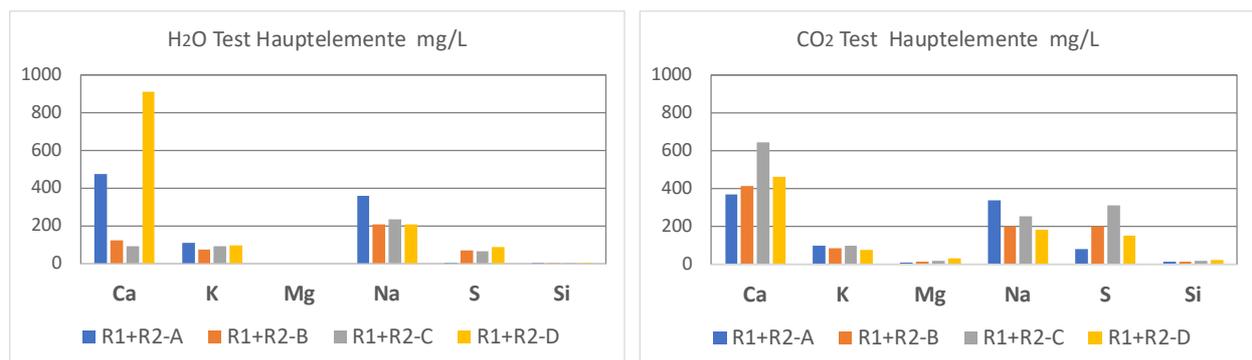


Abbildung 2: Konzentrationen der Matrixelemente der Wasser- und CO₂ VVEA-Tests.

Die Spurenelemente aller gemessenen Metalle zeigen rel. tiefe Gehalte und liegen, mit Ausnahme von Cu, unter den Grenzwerten gem. VVEA. Damit liegen die Cu-Gehalte der VVEA-Tests im

Bereich des Mittelwerts (0.87 mg/L) gemäss einer Langzeitstudie des Kantons Zürich (Glauser, 2022).

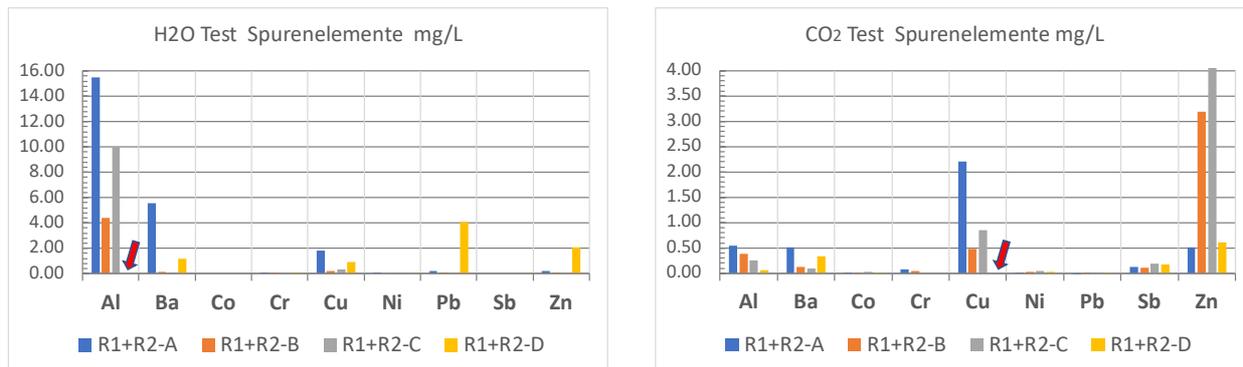


Abbildung 3: Konzentrationen der Spurenelemente der Wasser- und CO₂ VVEA-Tests nach 24 Std (lineare Darstellung).

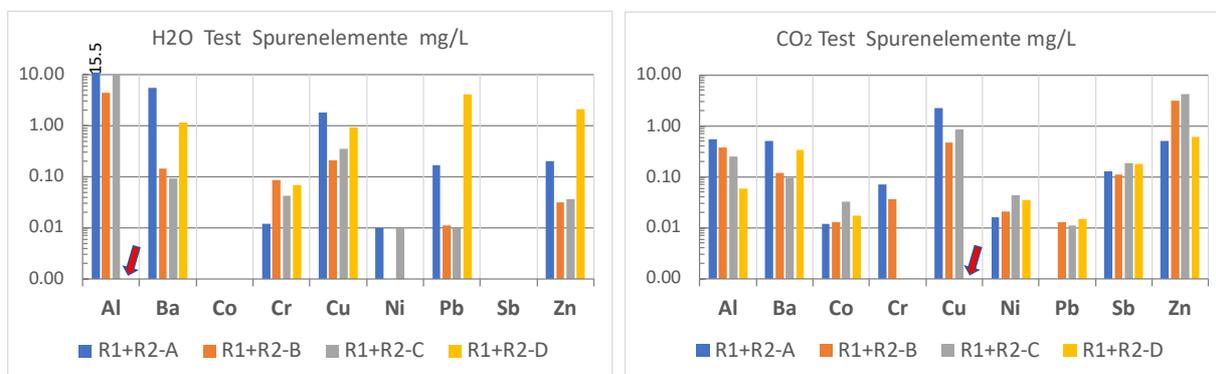


Abbildung 4: Konzentrationen der Spurenelemente der Wasser- und CO₂ VVEA Tests (logarithmische Darstellung).

Beim trockenen Austrag liegt die Konzentration von Al im Eluat unter der Nachweisgrenze, wie auch die von Cu im CO₂ Test. Es wird angenommen, dass die sehr tiefen Al-Gehalte mit dem stark basischen Milieu zusammenhängen. Der erste Kontakt mit Wasser führt zur Hydrolyse der Aluminiumoberflächen, wobei Wasserstoffgas freigesetzt und Al-Hydroxide gebildet werden. Die Ursache für den hohen pH-Wert wird auf die Reaktionen mit Ca-Oxiden zurückgeführt, was sich in den sehr hohen Ca Konzentrationen im Eluat ausdrückt. Al-Hydroxid kann unter diesen hohen pH-Bedingungen mit anderen Metallen Salze bilden und z.B. als Na- oder Ca-Aluminat ausfallen. Ähnliche Reaktionen können auch beim CO₂ Test ablaufen, wobei hier aber die kontinuierliche Zugabe der schwachen Säure zu einer Bindung von Cu an den Al-Hydroxiden oder zur Bildung von Cu-Karbonaten führen kann, was zu sehr tiefen Konzentrationen von Cu im CO₂ Test führen kann. Auch das reduzierende Milieu (die Fe²⁺ Konzentration liegt bei knapp 2mg/L) kann hier eine reduktive Abscheidung von Cu und Zn begünstigen.

Am Beispiel von Al (H₂O Test) und Cu (CO₂ Test) der Probe D sieht man, dass beim Batch-Ansatz die gemessenen Gehalte nur schwierig interpretiert werden können weil hier die extremen pH- bzw. Eh-Bedingungen beim Erstkontakt mit Wasser nicht abgebildet werden.

Säulentests

Durchflussexperimente geben einen besseren Einblick in den Verlauf der ablaufenden Reaktionen und bilden auch die Prozesse auf einer Deponie besser ab. Im Durchfluss verlassen die gelösten Ionen das Reaktionsgefäß und über den Zufluss gelangt neues entmineralisiertes Wasser dazu. Die Versuche mit der Bezeichnung R1+2 stehen für die entsprechenden Mischungen von R1-Restschlacken mit R2-Stäuben, die Versuche mit nur R1-Restschlacke sind als unterbrochene Linien dargestellt.

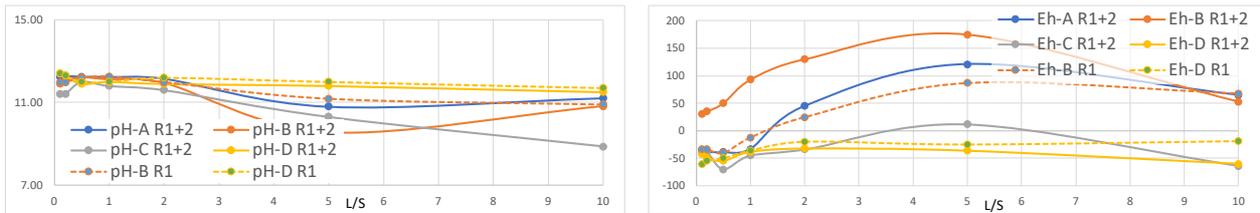


Abbildung 5: Verlauf der Leitparameter pH- und Eh-Wert (in mV AgCl-Pt) der Säulenversuche bei Wasser-Feststoffverhältnissen (L/S) von 0.1 bis 10 und einer Gesamtdauer von ca. 27 Tagen .

Die pH-Werte (Abb. 5) zeigen im Vergleich zu den VVEA-Versuchen zu Beginn leicht tiefere Werte und sinken bis L/S 10 weiter um ca. eine pH-Einheit ab. Die Schlacke C ist eine Schlacke, welche am längsten gealtert ist (mehrere Wochen) und wegen der fortgeschrittenen Karbonatisierung zeigt diese nach L/S 10 bereits deutliche tiefere pH-Werte, Werte, die sehr nahe an denen von Sickerwasserwerten von Deponien liegen (Glauser, 2022). Bei den Redoxbedingungen führt der Erstkontakt mit dem Wasser bei den meisten Schlacken zu tiefen Eh-Werten von ca. -50mV. Nach L/S 1 werden die Eluate oxidierender, nachdem die ersten Metalloberflächen oxidiert wurden und die Eh Werte steigen bis ca. L/S 5 kontinuierlich an. Der darauffolgende Rückgang des Eh-Wertes könnte mit der Freisetzung von organischen Säuren zusammenhängen.

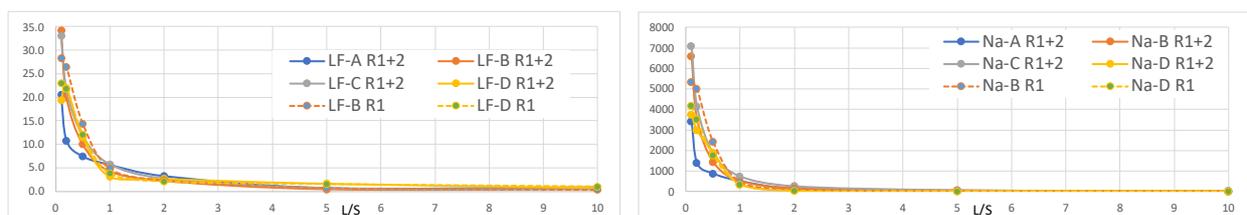


Abbildung 6: Verlauf der Leitfähigkeiten (mS/cm) und der Na-Konzentrationen (mg/L) der Säulenversuche bei zunehmenden Wasser-Feststoffverhältnissen (L/S) von 0.1 bis 10.

Die Leitfähigkeit ist anfänglich mit >20mS/cm sehr hoch und fällt bis zu L/S 1 bereits um ca. 85% ab. Der starke initiale Rückgang wird durch die sehr gut löslichen Na-Salze dominiert (Abb. 6), was an den sehr hohen Konzentrationen und dem mit der LF identischen Verlauf erkennbar ist.

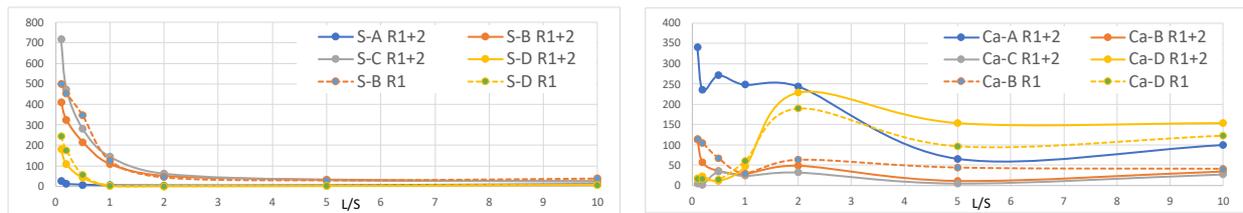


Abbildung 7: Verlauf der S- und der Ca-Konzentrationen (mg/L) der Säulenversuche bei zunehmenden Wasser-Feststoffverhältnissen (L/S) von 0.1 bis 10.

Der Rückgang der Schwefelfreisetzung (Abb. 7) ist im Vergleich zu den Salzen nur geringfügig langsamer und wird von den ebenfalls gut löslichen Sulfaten und nur untergeordnet von Sulfiden gesteuert. Auffallend sind die sehr tiefen Eluatgehalte der Schlackenmischung A, was auf die vorgängige Wäsche im Aufbereitungsprozess und die sehr hohen Ca-Gehalte zurückzuführen ist, welche die Lösung der Sulfate zusätzlich reduzieren. Die Ca-Konzentrationen sind anfänglich generell tief und nehmen dann bis L/S 2 zu. Die anfänglich tiefen Gehalte hängen damit zusammen, dass Ca-Oxide zuerst hydratisiert werden, bevor sie in Lösung gehen und v.a. auch weil die Konzentrationen der anderen Ionen wie z.B. Na und S sehr hoch sind und so die Lösung von Ca-Phasen vermindern. Die vergleichsweise tiefen Na- und sehr tiefen S-Gehalte der Schlacke A dürfte deshalb die Ursache für die höheren Ca-Gehalte bis L/S 2 sein.

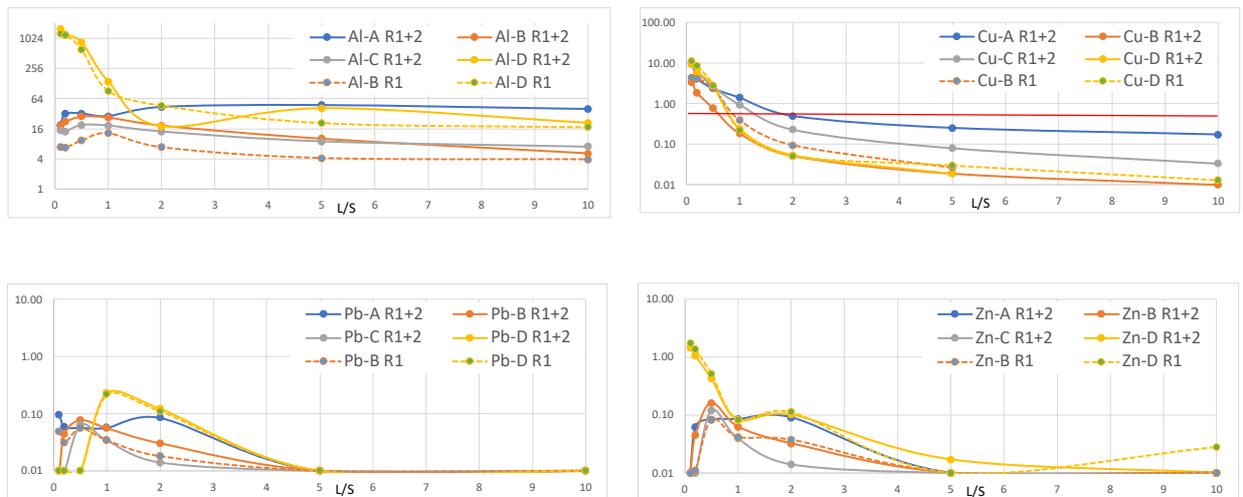


Abbildung 8: Verlauf der Al-, Cu-, Pb- und Zn-Konzentrationen (mg/L) der Säulenversuche bei zunehmenden Wasser-Feststoffverhältnissen (L/S) von 0.1 bis 10.

Die Freisetzung von Al (Abb. 8) dürfte v.a. über die Hydrolyse von metallischen Aluminiumpartikel ablaufen, die bei sehr hohen pH-Werten und wenig oxidierten Oberflächen begünstigt wird. Dies erklärt die sehr hohen Gehalte zu Beginn des Tests bei der trocken ausgetragenen Schlacke D und die relativ hohen Gehalte am Ende des Tests der Schlacke A, welche nur kurzen Kontakt mit Wasser hatte und deren Metallpartikel hohen elektrischen Entladungsspitzen ausgesetzt waren.

Die Cu-Gehalte liegen bei allen Schlacken unterhalb von L/S 1 deutlich über 0.5 mg/L, nehmen dann aber sehr schnell und kontinuierlich ab und liegen nach einem L/S 2 deutlich darunter.

Diejenigen Schlacken die wenig oder nicht gealtert sind (A, D) zeigen höhere Anfangskonzentrationen, die trocken ausgetragene Schlacke zeigt bei L/S 10 dann aber die deutlich tiefsten Gehalte. Die Cu-Mobilisierung wird wesentlich von der Produktion organischer Säuren gesteuert, deren Bildung mit dem Abbau der organischen Substanzen bei oxidierenden Bedingungen begünstigt wird. Bei den Eluat-Tests steht nur der gelöste Sauerstoff im Wasser (ca. 8-10 mg/L) zur Verfügung, auf einer Deponie kommt im ungesättigten Bereich zusätzlich Sauerstoff aus der Porenluft dazu, was zu einer höheren Produktion von organischen Säuren führen dürfte.

Die Metalle Pb und Zn zeigen generell sehr tiefe Gehalte, initial liegen die Konzentrationen für die meisten Schlacken unter der Nachweisgrenze gefolgt von einer Zunahme, die ab L/S 2 bei allen Schlacken wieder sinkt. Lediglich die Schlacke D zeigt bei Zn ein sehr ähnliches Verhalten wie bei Al, was ebenfalls der Hydrolyse und den frischen Metalloberflächen zugerechnet wird. Die tiefen Anfangskonzentrationen dürften durch die hohen S-Gehalte limitiert werden und die Maxima zwischen L/S 0.5 bis 2 durch eine Remobilisierung oder Mobilisierung als Chlorid-Komplexe.

Aus den Mengen und Konzentrationen der Eluate bei den verschiedenen Wasser-Feststoff Verhältnissen (Tab. 1) wurde die Gesamtzusammensetzung bei L/S 10 berechnet und in Abb. 9 dargestellt. Diese Gehalte entsprechen der Zusammensetzung, wenn das gesamte Eluat bis L/S 10 gesammelt worden wäre und kann so den VVEA Eluaten gegenübergestellt werden, die ebenfalls bei einem L/S 10 durchgeführt werden, allerdings nur während 24 Stunden. Mit dem CO₂ VVEA-Test soll eine ca. 100-jährige Exposition gegenüber einer schwachen Säuredeposition simuliert werden, der Zeitraum welcher beim Säulentest abgebildet wird liegt in einer ähnlichen Größenordnung, abhängig von der Infiltration des Niederschlags und der Mächtigkeit der Schlackenablagerung.

Tabelle 1: Berechnete Gesamtzusammensetzungen der Säulenversuche bei L/S 10 in mg/L.

El / Probe	R1+R2-A	R1+R2-B	R1+R2-C	R1+R2-D	R1-B	R1-D
Al	41.193	10.111	9.348	81.180	5.021	62.491
B	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.
Ba	1.084	0.069	0.075	1.579	0.115	1.491
Ca	122.716	29.548	20.959	149.348	45.871	113.708
Cd	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.
Co	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.
Cr	b.d.	b.d.	0.001	b.d.	0.063	b.d.
Cu	0.600	0.104	0.330	0.244	0.209	0.289
Fe	b.d.	b.d.	0.001	0.002	b.d.	0.002
K	68.632	105.232	150.704	72.478	115.803	73.851
Mg	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.
Mn	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.
Mo	0.069	0.104	0.161	0.068	0.106	0.074
Na	162.869	210.177	252.870	147.109	239.197	148.389
Ni	0.005	0.002	0.009	0.001	0.003	0.002
P	b.d.	0.006	0.022	0.252	0.007	0.288
Pb	0.015	0.008	0.005	0.023	0.006	0.021
S	7.935	45.444	53.481	8.740	59.362	9.780
Sb	0.006	0.017	0.009	0.015	0.000	0.018
Si	1.177	2.913	3.830	1.535	5.835	1.456
Ti	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.
V	b.d.	0.001	0.001	b.d.	0.001	b.d.
Zn	0.016	0.011	0.007	0.053	0.008	0.071

Die Konzentrationen der Batch- und die der Säulentests liegen für alle Elemente in einer ähnlichen Grössenordnung. Bei den VVEA-Tests überschreiten bei Cu bei beiden Tests zwei Schlacken die 0.5mg/L, beim Säulentest liegt nur Probe A darüber.

Die Al-Gehalte liegen bei den Proben A und D deutlich über 10mg/L, die gealterten Schlacken B und C zeigen deutlich tiefere Werte im Bereich des Grenzwertes. Hier gilt es aber zu bedenken, dass diese Grenzwerte für den CO₂-Test definiert wurden und dass der gemessene pH-Bereich beim CO₂-Test bei ca. 6-7 liegt, wo die Löslichkeit von Al ein Minimum erreicht.

Generell zeigt sich, dass der Säulentest robuster ist, z.B. bei der trocken ausgetragenen Schlacke, wo Al (H₂O-Test) und Cu (CO₂-Test) vollständig ausgefällt werden und im Eluat unter der Nachweisgrenze liegen, in den Schlackendeponien wird Cu aber regelmässig nachgewiesen.

Einfluss der R2-Stäube auf die Freisetzung

Für die beiden Schlacken B und D wurden zusätzlich die R1-Schlacken einzeln getestet, um den Einfluss der R2-Stäube auf das Eluat abzuschätzen.

Die Resultate zeigen keinen eindeutigen Trend. Die Gehalte von Al sind in beiden R1+R2 Proben erhöht, aber bei Cu zeigen beide Proben und bei Zn und Pb eine Probe sogar leicht höherer Konzentrationen in den Proben ohne R2-Stäube. Geht man von einer Bestimmungsunsicherheit von 10% aus, so lassen sich kaum signifikanten Unterschiede erkennen.

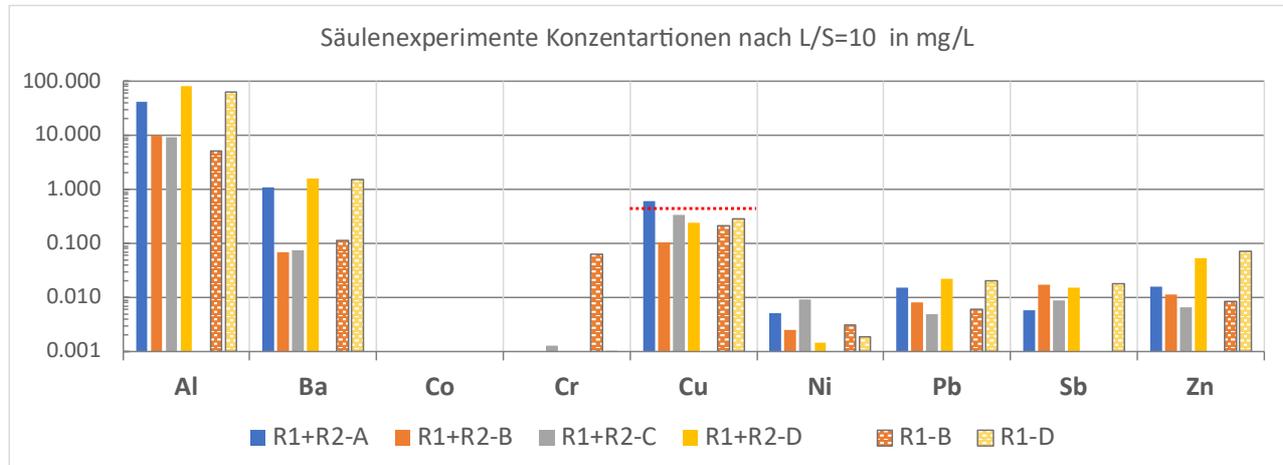


Abbildung 9: Berechnete Eluatgehalte der Säulenexperimente nach L/S 10 in mg/L.

Es gibt zwei Gründe für die sehr geringen Unterschiede in den Metallkonzentrationen der Eluate zwischen den R1+R2 und den R1-Schlacken. Zum einen sind die relativen Anteile der R2-Stäube im Vergleich zu den R1-Schlacken sehr gering. Zum anderen ist bereits in den R1-Schlacken das Freisetzungspotential an Metallen sehr hoch und wird hauptsächlich über das chemische Milieu gesteuert, wie der Hydrolyse der Metalle (Eh) und der Pufferung durch das Karbonatsystem (pH). Damit tragen auch die wesentlich geringere Korngrösse und die damit verbundene grössere Oberfläche der R2-Stäube kaum zu einer signifikanten Erhöhung der Konzentrationen im Eluat bei.

7.3. Analysen

Batchversuche VVEA

Tabelle 1: Analysen der VVEA-Tests mit CO₂ und H₂O.

VVEA CO₂

Probe	R1+R2-A	R1+R2-B	R1+R2-C	R1+R2-D
pH	5.72	5.63	6.16	6.18
LF	3.54	2.87	3.77	2.96
Element [mg/L]				
Aluminium	0.549	0.38	0.248	0.059
Bor	0.488	0.875	1.76	0.92
Barium	0.512	0.12	0.096	0.336
Calcium	370	413	647	463
Cadmium	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
Cobalt	0.012	0.013	0.032	0.017
Chrom	0.071	0.036	<0.01	<0.01
Kupfer	2.21	0.479	0.858	<0.01
Eisen	0.029	0.078	0.127	1.97
Kalium	97.7	82.6	96.9	74.6
Magnesium	6.9	11.6	19.5	30.3
Mangan	0.096	0.416	0.722	0.673
Molybdän	0.11	0.087	0.156	0.184
Natrium	337	201	252	184
Nickel	0.016	0.021	0.044	0.035
Phosphor	<0.4	<0.4	<0.4	<0.4
Blei	<0.01	0.013	0.011	0.015
Schwefel	81.7	202	311	150
Antimon	0.127	0.112	0.186	0.179
Silicium	12.1	13.2	17.6	23
Titan	0.015	<0.01	<0.01	<0.01
Vanadium	0.012	<0.01	<0.01	<0.01
Zink	0.511	3.19	4.17	0.606

VVEA H₂O

Probe	R1+R2-A	R1+R2-B	R1+R2-C	R1+R2-D
pH	12.3	11.61	11.77	12.78
LF	6.8	2.54	2.27	9.7
Element [mg/L]				
Aluminium	15.5	4.39	10	<0.01
Bor	<0.4	<0.4	<0.4	<0.4
Barium	5.54	0.144	0.092	1.14
Calcium	476	125	92.1	911
Cadmium	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
Cobalt	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
Chrom	0.012	0.085	0.043	0.07
Kupfer	1.83	0.211	0.353	0.933
Eisen	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
Kalium	110	77.2	94	95.5
Magnesium	<0.4	<0.4	<0.4	<0.4
Mangan	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
Molybdän	0.083	0.102	0.128	0.184
Natrium	360	207	234	211
Nickel	0.01	<0.01	0.01	<0.01
Phosphor	<0.4	<0.4	<0.4	<0.4
Blei	0.17	0.011	0.01	4.05
Schwefel	2.74	70.9	66.1	90.3
Antimon	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
Silicium	1.56	5.23	3.41	0.559
Titan	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
Vanadium	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
Zink	0.205	0.032	0.037	2.1

Säulenversuche

Tabelle 2: Mengen und Analysen der einzelnen Fraktionen der separat entnommenen Eluate bei den verschiedenen L/S Verhältnissen.

L/S	RM-A	Gewicht (g)	pH-A R1+2	LF-A R1+2	Eh-A R1+2	Al-A R1+2	Ba-A R1+2	Ca-A R1+2	Cr-A R1+2	Cu-A R1+2	Fe-A R1+2	K-A R1+2	Mo-A R1+2	Na-A R1+2	Ni-A R1+2	P-A R1+2	Pb-A R1+2	S-A R1+2	Sb-A R1+2	Si-A R1+2	V-A R1+2	Zn-A R1+2
0.1	A1	129.2	12.25	20.5	-35	19.1	2.670	340.0	b.d.	10.100	b.d.	1004	0.716	3427	0.127	b.d.	0.096	25.4	b.d.	8.25	b.d.	b.d.
0.2	A2	57.2	12.28	10.8	-38	31.8	1.900	235.0	b.d.	4.270	b.d.	505	0.378	1392	0.055	b.d.	0.059	12	b.d.	4.54	b.d.	0.061
0.5	A3	180.6	12.25	7.4	-39	32.2	1.950	271.0	b.d.	2.390	b.d.	313	0.237	868	0.031	b.d.	0.057	7.6	b.d.	3.46	b.d.	0.083
1	A4	304.1	12.23	5.6	-33	28.6	2.320	248.0	b.d.	1.410	b.d.	203	0.176	504	0.021	b.d.	0.057	4.7	b.d.	2.52	b.d.	0.084
2	A5	611.2	12.15	3.2	45	43.7	2.330	244.0	b.d.	0.498	b.d.	76.5	0.103	125	b.d.	b.d.	0.085	3.7	0.012	1.03	b.d.	0.090
5	A6	1828.5	10.80	0.65	121	47.7	1.139	66.0	b.d.	0.253	b.d.	29.9	0.084	32.4	b.d.	b.d.	b.d.	4.25	0.016	0.519	b.d.	b.d.
10	A7	3072.6	11.21	0.82	65	39.7	0.548	100.0	b.d.	0.174	b.d.	15	b.d.	12.7	b.d.	b.d.	b.d.	10.5	b.d.	0.97	b.d.	b.d.
L/S	RM-B	Gewicht (g)	pH-B R1+2	LF-B R1+2	Eh-B R1+2	Al-B R1+2	Ba-B R1+2	Ca-B R1+2	Cr-B R1+2	Cu-B R1+2	Fe-B R1+2	K-B R1+2	Mo-B R1+2	Na-B R1+2	Ni-B R1+2	P-B R1+2	Pb-B R1+2	S-B R1+2	Sb-B R1+2	Si-B R1+2	V-B R1+2	Zn-B R1+2
0.1	B1	85.7	11.92	34.2	30	18.6	0.182	113.0	b.d.	3.400	b.d.	2330	2.290	6582	0.098	b.d.	b.d.	411	b.d.	13	b.d.	b.d.
0.2	B2	69.8	12.05	20.0	35	22.3	0.108	56.3	b.d.	1.870	b.d.	1269	1.610	3527	0.059	0.674	0.044	323	0.016	12.7	0.018	0.045
0.5	B3	218.1	12.20	10.0	50	28.1	0.087	35.8	b.d.	0.770	b.d.	658	0.820	1437	0.028	b.d.	0.076	216	0.022	10.9	0.019	0.160
1	B4	365.9	12.10	4.2	93	27.1	0.078	28.4	b.d.	0.185	b.d.	231	0.260	504	b.d.	b.d.	0.055	108	0.023	8.55	0.014	0.062
2	B5	739.0	11.93	2.2	130	18.7	0.096	48.4	b.d.	0.052	b.d.	109	0.074	161	b.d.	b.d.	0.030	50.2	0.019	5.67	b.d.	0.032
5	B6	2296.8	9.55	0.43	175	10.2	0.041	11.3	b.d.	0.019	b.d.	48.8	0.031	40.8	b.d.	b.d.	b.d.	31.8	0.016	2.03	b.d.	b.d.
10	B7	3713.0	10.81	0.48	53	5.19	0.076	34.4	b.d.	0.010	b.d.	21.3	0.019	14.3	b.d.	b.d.	b.d.	23.1	0.017	1.47	b.d.	b.d.
L/S	RM-C	Gewicht (g)	pH-C R1+2	LF-C R1+2	Eh-C R1+2	Al-C R1+2	Ba-C R1+2	Ca-C R1+2	Cr-C R1+2	Cu-C R1+2	Fe-C R1+2	K-C R1+2	Mo-C R1+2	Na-C R1+2	Ni-C R1+2	P-C R1+2	Pb-C R1+2	S-C R1+2	Sb-C R1+2	Si-C R1+2	V-C R1+2	Zn-C R1+2
0.1	C1	71.4	11.40	39.1	-40	14.9	0.068	4.4	0.12	9.550	b.d.	3069	3.290	7091	0.335	b.d.	b.d.	717	b.d.	16.2	b.d.	b.d.
0.2	C2	65.1	11.40	21.6	-38	14.2	0.066	2.1	0.016	6.000	0.018	1791	2.420	4149	0.205	0.944	b.d.	473	0.011	14	0.014	b.d.
0.5	C3	210.5	12.00	11.7	-70	18.9	0.077	33.7	b.d.	2.620	0.02	923	1.240	1857	0.087	0.473	0.064	280	0.017	12.1	0.014	0.119
1	C4	352.0	11.80	5.7	-45	18.5	0.068	23.8	b.d.	0.941	b.d.	378	0.521	735	0.033	b.d.	0.034	144	0.021	8.92	0.010	0.039
2	C5	705.0	11.60	2.7	-34	14.1	0.084	32.3	b.d.	0.230	b.d.	160	0.147	259	b.d.	b.d.	0.014	61.3	0.014	5.55	b.d.	0.014
5	C6	2108.0	10.30	0.61	12	9.02	0.076	4.7	b.d.	0.081	b.d.	52.2	0.062	68.6	b.d.	b.d.	b.d.	29.9	b.d.	3.43	b.d.	b.d.
10	C7	3810.0	8.87	0.43	-64	7.09	0.073	27.5	b.d.	0.034	b.d.	57.1	0.029	25.8	b.d.	b.d.	b.d.	24.6	0.011	2.4	b.d.	b.d.
L/S	RM-D	Gewicht (g)	pH-D R1+2	LF-D R1+2	Eh-D R1+2	Al-D R1+2	Ba-D R1+2	Ca-D R1+2	Cr-D R1+2	Cu-D R1+2	Fe-D R1+2	K-D R1+2	Mo-D R1+2	Na-D R1+2	Ni-D R1+2	P-D R1+2	Pb-D R1+2	S-D R1+2	Sb-D R1+2	Si-D R1+2	V-D R1+2	Zn-D R1+2
0.1	D1	65.5	12.40	19.3	-42	15.59	0.326	17.3	b.d.	9.510	0.089	1598	1.610	3761	0.053	8.03	b.d.	180	0.147	6.89	b.d.	1.450
0.2	D2	64.2	12.30	22.0	-49	12.24	0.406	22.9	b.d.	5.980	0.064	1275	1.120	2984	0.038	5.67	b.d.	108	0.097	5.95	0.010	1.040
0.5	D3	199.4	11.90	11.5	-55	847	0.558	11.6	b.d.	2.790	0.027	959	0.538	1897	0.021	3.39	b.d.	41.7	0.059	4.07	b.d.	0.424
1	D4	340.8	12.00	3.1	-38	141	4.360	47.2	b.d.	0.238	b.d.	193	0.057	340	b.d.	0.618	0.231	2.97	0.014	0.891	b.d.	0.081
2	D5	659.0	11.90	2.7	-32	18.1	6.400	229.0	b.d.	0.054	b.d.	30.4	0.011	38.2	b.d.	b.d.	0.121	0.704	b.d.	0.463	b.d.	0.101
5	D6	2037.0	11.80	1.6	-36	41.2	1.790	154.0	b.d.	0.019	b.d.	11.2	0.026	19.6	b.d.	b.d.	b.d.	1.83	b.d.	0.573	b.d.	0.017
10	D7	3672.0	11.50	0.8	-60	21.2	0.436	154.0	b.d.	b.d.	b.d.	6.46	0.031	10.4	b.d.	b.d.	b.d.	7.97	0.020	2.01	b.d.	b.d.
L/S	R1T-B	Gewicht (g)	pH-B R1	LF-B R1	Eh-B R1	Al-B R1	Ba-B R1	Ca-B R1	Cr-B R1	Cu-B R1	Fe-B R1	K-B R1	Mo-B R1	Na-B R1	Ni-B R1	P-B R1	Pb-B R1	S-B R1	Sb-B R1	Si-B R1	V-B R1	Zn-B R1
0.1	R1-B1	86.8	11.96	28.3	-34	6.93	0.140	114.0	1.12	4.490	b.d.	2045	2.150	5340	0.085	b.d.	0.049	501	b.d.	16.2	b.d.	b.d.
0.2	R1-B2	66.0	11.98	26.4	-33	6.71	0.143	105.0	0.81	4.160	b.d.	1897	1.850	5007	0.074	0.774	0.031	454	b.d.	15.8	b.d.	0.011
0.5	R1-B3	206.7	12.18	14.4	-40	9.37	0.101	66.9	0.545	2.450	b.d.	900	1.170	2407	0.044	b.d.	0.055	346	b.d.	15.5	0.017	0.082
1	R1-B4	347.5	12.25	4.8	-12	13.2	0.087	29.9	0.132	0.391	b.d.	243	0.199	469	b.d.	b.d.	0.034	126	b.d.	12.1	0.015	0.041
2	R1-B5	700.6	11.98	2.4	25	6.89	0.136	63.0	0.037	0.096	b.d.	117	0.063	129	b.d.	b.d.	0.018	45	b.d.	7.49	b.d.	0.037
5	R1-B6	2852.0	11.18	0.7	87	4.18	0.107	43.7	0.035	0.027	b.d.	34.1	0.025	27.7	b.d.	b.d.	b.d.	30.5	b.d.	4.76	b.d.	b.d.
10	R1-B7	2685.2	10.90	0.4	68	3.93	0.120	40.5	b.d.	b.d.	b.d.	19.3	b.d.	13.9	b.d.	b.d.	b.d.	39.1	b.d.	4.41	b.d.	b.d.
L/S	R1T-D	Gewicht (g)	pH-D R1	LF-D R1	Eh-D R1	Al-D R1	Ba-D R1	Ca-D R1	Cr-D R1	Cu-D R1	Fe-D R1	K-D R1	Mo-D R1	Na-D R1	Ni-D R1	P-D R1	Pb-D R1	S-D R1	Sb-D R1	Si-D R1	V-D R1	Zn-D R1
0.1	R1-D1	63.4	12.40	23.0	-60	12.58	0.264	16.1	b.d.	11.500	0.097	1803	1.980	4160	0.073	9.89	b.d.	243	0.137	9.21	b.d.	1.730
0.2	R1-D2	64.3	12.30	21.8	-55	11.70	0.315	15.4	0.018	8.650	0.071	1548	1.590	3513	0.059	7.93	b.d.	176	0.111	7.64	0.017	1.380
0.5	R1-D3	200.9	12.00	12.1	-50	610	0.509	14.8	b.d.	2.850	0.019	907	0.611	1765	0.024	3.61	b.d.	54.3	0.063	4.18	b.d.	0.516
1	R1-D4	339.0	12.00	3.8	-36	91	3.890	60.7	b.d.	0.225	b.d.	199	0.046	343	b.d.	0.62	0.217	3.03	0.014	0.936	b.d.	0.083
2	R1-D5	678.0	12.20	2.1	-20	46.8	5.020	190.0	b.d.	0.051	b.d.	28.7	0.013	36	b.d.	b.d.	0.110	0.634	b.d.	0.415	b.d.	0.112
5	R1-D6	2120.0	12.00	1.5	-25	21.1	1.570	96.7	b.d.	0.030	b.d.	9.25	0.018	15.1	b.d.	b.d.	b.d.	2.69	0.011	0.678	b.d.	b.d.
10	R1-D7	3732.0	11.70	0.99	-19	17.4	0.681	123.0	b.d.	0.013	b.d.	7.76	0.032	13.7	b.d.	b.d.	b.d.	6.86	0.019	1.75	b.d.	0.028

8. Referenzen

BAFU (Hrsg.) 2022: Messmethoden im Abfall- und - Altlastenbereich. 1. aktualisierte Auflage 2022. Erstausgabe 2017. Bundesamt für Umwelt, Bern. Umwelt-Vollzug Nr. 1715: 106 S.

Breitenstein, B., Goldmann, D., Quedenfeld, I., 2013. ReNe Verfahren zur Rückgewinnung von dissipativ verteilten Metallen aus Verbrennungsrückständen der thermischen Abfallbehandlung, in: Thomé-Kozmiensky, K.J. (Ed.), Aschen Schlacken Stäube – aus Abfallverbrennung und Metallurgie. TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, Neuruppin. 341-352.

CEN/TS 14405, 2017. Characterization of waste - Leaching behaviour tests - Up-flow percolation test (under specified conditions). European Committee for Standardization.

Eggimann, M., 2008. Geochemical aspects of municipal solid waste incineration bottom ash and implications for disposal. Doctoral Thesis, University of Bern. 246 S.

Glauser, A., 2021. Factors influencing the quality of bottom ash from municipal solid waste incineration in Switzerland. Doctoral Thesis, University of Bern. 222 S.

Glauser, A., Morf, L., Weibel, G., Eggenberger, U. 2022. Ten-years monitoring of MSWI bottom ashes with focus on TOC development and leaching behaviour. Waste Management 117. 104–113.

Schweizerische Eidgenossenschaft, 2016. Verordnung über die Vermeidung und die Entsorgung von Abfällen (VVEA). 1-46.

9. Impressum

- Auftraggeber:** Bundesamt für Umwelt BAFU
Abteilung Abfall und Rohstoffe
3003 Bern
Das BAFU ist ein Amt des Eidg. Departements für Umwelt, Verkehr, Energie
und Kommunikation (UVEK)
- Auftragnehmer:** Universität Bern
Institut für Geologie
Fachstelle für Sekundärrohstoffe
Baltzerstrasse 1+3, 3012 Bern
- Autor:** Dr. Urs Eggenberger
Leiter der Fachstelle Sekundärrohstoffe
- Begleitgruppe:** Daniel Chambaz (Kt. Genf)
Gertrud Engelhardt (Kt. Basel Stadt)
Ruedi Kummer (Renergia)
Leo Morf (Kt. Zürich)
Thierry Pralong (Kt. Wallis)
Robin Quartier (VBSA)
David Schönbächler (Kt. Aargau)
Oliver Steiner (Kt. Bern)
Dominic Utinger (Kt. Basel Landschaft)
Xavier Pellet (Satom SA)
- Hinweis:** Diese Studie wurde im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) verfasst.
Für den Inhalt ist allein der Auftragnehmer verantwortlich.

Das Projekt wurde vom BAFU initiiert und finanziert.

Der VBSA leistete einen namhaften Beitrag für die Mehraufwände der mehrwöchigen Probenahme auf der Anlage A.

Für die grosse Unterstützung und die grossen Mehraufwände bei den Probenahmen auf den vier Anlagen bedanken wir uns herzlich; insbesondere auch für die Mehraufwände für die Veredelung der vier Chargen auf der supersort®metall der DHZ.