

20 Jahre Schlackentrockenaustrag 10 Jahre industrielle Schlackenaufbe- reinigung – Status und Ziele



Impressum

Stiftung ZAR

Die Stiftung bezweckt die Förderung einer nachhaltigen Stoffpolitik im Rahmen der Behandlung und Verwertung von Abfällen. Sie fördert die Weiterentwicklung des Standes der Technik und unterstützt die entsprechenden Entwicklungsaktivitäten. Die Stiftung kann auch die Verwertung der Erkenntnisse unterstützen.

Stiftung Zentrum für nachhaltige Abfall- und Ressourcennutzung

Wildbachstrasse 2

CH - 8340 Hinwil

Tel + 41 44 938 31 11

Fax + 41 44 938 31 08

E-mail info@zar-ch.ch

www.zar-ch.ch

Diese Publikation ZAR-Schriftenreihe wird von der Stiftung ZAR kostenlos abgegeben. Der Weiterverkauf oder eine wie auch immer geartete kommerzielle Nutzung sind daher nicht zulässig.

PDF-Download auf www.zar-ch.ch. Nachdruck oder elektronische Wiedergabe von Text und Bild ausschliesslich mit Quellenangaben gestattet.

Erhältliche Publikationen der ZAR-Schriftenreihe

N°	Titel	Autor	Jahr
001	Industrielle Schlackenaufbereitung – Status und Ziele	D. Böni	2020
002	Deponie Chrüzlen – Monitoring und Emissionsprognose des Trockenschlackenkompartmentes	G. Weibel	2020
003	20 Jahre Schlackentrockenaustrag 10 Jahre industrielle Schlackenaufbereitung – Status und Ziele	D. Böni	2025

Management Summary

Die Stiftung Zentrum für nachhaltige Abfall- und Ressourcennutzung ZAR wurde vor 15 Jahren mit dem Ziel gegründet, eine nachhaltige Stoffpolitik im Rahmen der Behandlung und Verwertung von Abfällen zu fördern, die Weiterentwicklung des Standes der Technik zu unterstützen und mit den interessierten Kreisen dafür zu sorgen, dass die gewonnenen Erkenntnisse in die Anlagenentwicklung und in den Anlagenbau in der Schweiz und im Ausland einfließen.

Mit der Inbetriebnahme der Aufbereitungsanlage für Trockenschlacke der ZAV Recycling AG im Jahr 2015 wurde der Nachweis erbracht, dass auch feinste Metalle in grossen Mengen und ausgezeichneter und konstanter Qualität im industriellen Massstab aus der Trockenschlacke separiert und zum Teil ohne weitere Aufbereitung direkt in den Stoffkreislauf zurückgeführt werden können. In den letzten sieben Jahren wurde die Anlage mit dem folgenden Fokus weiterentwickelt:

- Höhere Effizienz der Metallseparation (tieferer Restmetallgehalt in der aufbereiteten Schlacke)
- Qualitätsverbesserung der Metalle zur Erhöhung der ökologisch äusserst relevanten Schmelzausbeute, der Marktakzeptanz und der Wertschöpfung
- Qualitätsverbesserung von Teilen der aufbereiteten Schlacke (Mineralik)
- Vollständige Automatisierung der verschiedenen Aufbereitungsprozesse
- Qualitätsmanagement
- Bestimmung des ökologischen Nutzens der Schlackenaufbereitung
- Reduktion des Instandhaltungsaufwandes

Parallel zu diesen Aktivitäten wurde am Trockenausstrag gearbeitet mit dem Ziel einen kompletten Luftabschluss zwischen dem Ofen und dem Austrag zu garantieren. Auch wurden die Probenahme, Probeaufbereitung und Analysen optimiert, zur verlässlichen Bestimmung der Performance des Anlagebetriebs und zur weiteren Optimierung der Prozesse.

Mit diesem Dokument wird der Status des Austrages von Trockenschlacke aus der thermischen Verwertung von Abfällen in der KEZO, Hinwil und der industriellen Schlackenaufbereitungsanlage der ZAV Recycling AG, Hinwil (Status-2025) beschrieben. Zudem sollen die zukünftigen Entwicklungsziele aufgezeigt werden.

Im Sinne der Zweckbestimmungen der Stiftung ZAR werden die Erfahrungen mit der Absicht weitergegeben, die verantwortlichen Behörden und die Betreiber von thermischen Abfallverwertungs- und Schlackenaufbereitungsanlagen zu motivieren, das grosse ökologische und ökonomische Potential der Schlacke nachhaltig zu nutzen.

Der Status einer Schlackenaufbereitungsanlage kann nicht mit einer einzigen Schlüsselzahl beschrieben werden. Das Potential der vielen verschiedenen Metalle und Mineralien in der Schlacke ist so vielfältig, dass je nach Bewertungsmethode eine unterschiedliche Beurteilung resultiert. So ist zum Beispiel das Metall Aluminium bezüglich Klimabelastung (CO₂eq) äus-

serst relevant, bezüglich Umweltbelastung (UBP) aber eher unbedeutend. Es gibt auch Elemente (z.B. Gold), die nur in kleinsten Mengen in der Schlacke zu finden sind, d.h. von der Menge her vernachlässigbar sind, aber einen signifikanten Einfluss auf die Ökologie und Ökonomie haben.

Es ist der Inhomogenität der Schlacke geschuldet, dass die Beurteilungsperiode über eine längere Betriebszeit erfolgen muss, um keine systematischen Fehler bei der Bewertung einer Schlackenaufbereitungsanlage zu machen. Auch müssen Metalle, welche nur in kleinsten Konzentrationen in der Schlacke enthalten sind, angereichert werden, damit diese zuverlässig bestimmt werden können.

Gegenüber der Schriftenreihe 001 «Industrielle Schlackenaufbereitung – Status und Ziele» in der 13 Schlüsselzahlen zur umfassenden Beurteilung einer Schlackenaufbereitung definiert wurden, sind wir heute der Ansicht, dass die folgenden 3 Schlüsselzahlen ausreichend sind:

- 1) Durchschnittlicher Ertrag sämtlicher Metalle in einer repräsentativen Zeitperiode (nur Metalle, die in den Metallkreislauf zurückgeführt werden, generieren einen Ertrag). Bei sehr stark schwankenden Metallpreisen, wie dies zurzeit bei Gold und Silber der Fall, ist muss die Zeitperiode sehr kurz angesetzt werden. Die Schlüsselzahlen 2 und 3 basierend auf der ausgewiesenen Schmelzausbeute oder der Schmelzanalyse und blenden damit die Schwankungen der Metallpreise aus, daher sind für eine Beurteilung immer alle 3 Schlüsselzahlen zu berücksichtigen.
- 2) Ökologische Gesamtbeurteilung: UBP (**UmweltBelastungsPunkte**) auf Basis der Metallausbeute oder der Schmelzanalyse für die relevanten Metalle
- 3) Klimaschutz Beurteilung: CO₂equ. auf Basis der Metallausbeute oder der Schmelzanalyse

Der Restmetallgehalt in der aufbereiteten Schlacke dient zur Optimierung der Anlage und ist auf Grund der unterschiedlichen Messmethoden und auch Aufbereitungskonzepte als absoluter Vergleichszahl nicht zielführend.

Bei diesen Schlüsselzahlen gilt es zu berücksichtigend, dass der Metallgehalt in der Schlacke regional bzw. international unterschiedlich sein kann, da diese vom Abfallinput abhängig sind. Die Bestimmung des Gehaltes der Hauptmetalle in der Rohschlacke ermöglicht eine Positionierung zum Benchmark. So ist zum Beispiel der Gehalt der Hauptmetalle in den Ballungsgebieten in Italien signifikant höher als in der Schweiz.

Mit der international eingetragenen Marke thermo-re® verfügt die Stiftung ZAR über ein Label und ein klares Konzept, mit dem aufgezeigt wird, wie mit der thermischen Abfallbehandlung eine grosse Wertstoffrückgewinnung und eine Reduktion der Gesamtumweltwirkung realisiert und erreicht werden können: **Eine positive Botschaft und ein Beitrag zur Kreislaufwirtschaft.**

Inhalt

1.	Ökologischer Nutzen	6
2.	Austrag von Trockenschlacke	10
3.	Aufbereitung von Schlacke	19
4.	Zukünftig anzustrebende Optimierungen	36
5.	Aktuelles Aufbereitungsverfahren der ZAV Recycling AG (2025).....	40
6.	Die Mineralik in der Schlacke	42
7.	Metallerträge	44
8.	Historie.....	46

1. Ökologischer Nutzen

Das Ziel, einer zukunftsorientierten Kreislaufwirtschaft besteht darin, die natürlichen Ressourcen zu schonen und den Schutz von Menschen und Umwelt im Umgang mit Abfällen sicher zu stellen. Mit dem Konsum von Gütern und den damit verbundenen sehr grossen Materialflüssen, die wir uns seit über 50 Jahren leisten, steht die ganze Gesellschaft in einer besonderen Verantwortung, wenn der Begriff der Kreislaufwirtschaft nicht nur ein Postulat, sondern gelebte Wirklichkeit werden soll. Mit einer griffigen Gesetzgebung, entsprechenden marktwirtschaftlichen Anreizen und dem selbstverantwortlichen Handeln der einzelnen Personen, können wir auf langlebige Produkte setzen und dafür sorgen, dass Abfälle möglichst direkt wieder einer stofflichen Nutzung zugeführt werden.

In der Schweiz fallen aus dem Bereich der Siedlungsabfälle sowie aus Industrie und Gewerbe jährlich 4'000'000 Tonnen Abfälle an, die nicht direkt verwertet, sondern der thermischen Behandlung zugeführt werden. Es ist ganz entscheidend, wie wir mit dieser Abfallkategorie umgehen, weil es sich um einen relevanten Massenstrom handelt. Die Akteure der thermischen Kehrichtverwertungsanlagen haben es in der Hand, in diesem Bereich ökologischen Nutzen zu generieren. So kann bei der thermischen Behandlung von Abfällen ein signifikanter Beitrag für die Kreislaufwirtschaft und für den Klimaschutz geleistet werden. Es können die in den Abfällen enthaltenen metallischen Wertstoffe als Substitution von Primärrohstoffen wieder in den Wirtschaftskreislauf zurückgeführt werden. Damit können CO₂ Emissionen eingespart und weitere Umweltschäden vermieden werden, die bei der Bereitstellung der Metalle anfallen würden. Die bei der thermischen Behandlung anfallende Energie kann – verbunden mit den entsprechenden CO₂ Einsparungen – zudem effizient genutzt werden. Weiter sollte auch berücksichtigt werden, dass die thermische Verwertung von Abfällen rund zehnmal weniger CO₂ produziert als die Deponierung von Abfällen. Da heute weltweit der grösste Teil der Abfälle immer noch in «Deponien» abgelagert werden, ist die thermische Verwertung von Abfällen ein kostengünstiges Klimaprojekt mit grossem nachweisbarem Nutzen. Weiter hat der Bau und der Betrieb der Abfallanlagen einen grossen Einfluss auf die Emissionen, die beim Behandlungsprozess und bei der späteren Ablagerung der Verbrennungsrückstände anfallen.

Die Aufbereitung der in der Kehrichtverwertungsanlage trocken ausgetragenen Schlacke ist nur ein kleiner Teil des Systems der thermischen Abfallbehandlung, deren ökologischer Nutzen ist jedoch vergleichbar mit der ökonomisch viel aufwändigeren Gewinnung von Strom und Wärme aus dem Abfall. Zusammen gefasst ist die Aufbereitung der trocken ausgetragenen Schlacke ein kleiner Teil des Gesamtsystems der Abfallwirtschaft mit einem grossen ökologischen und ökonomischen Nutzen.

1.1. Systemgrenze

Für die Beurteilung der Recycling-Effizienz aus der thermischen Verwertung von Abfällen sollte die Systemgrenze basierend auf dem Kreislaufmodell den gesamten Aufbereitungsprozess vom Austrag bis hin zum produzierten bzw. verkaufsfähigen Metall berücksichtigt werden (rote strichpunktierte Linie). Damit wird nicht das Metallpotential beurteilt, sondern nur die Metallmenge, die wieder über das Schmelzwerk in den Metallkreislauf zurückgeführt werden

kann. In den letzten Jahren wurde immer wieder versucht, die verschiedenen Schlackenaufbereitungen (grüne strichpunktierte Linie) zu beurteilen und hat die vor- und nachgeschalteten Prozesse nicht oder zu wenig betrachtet. Entsprechend nichts sagend waren dadurch die Schlussfolgerungen.

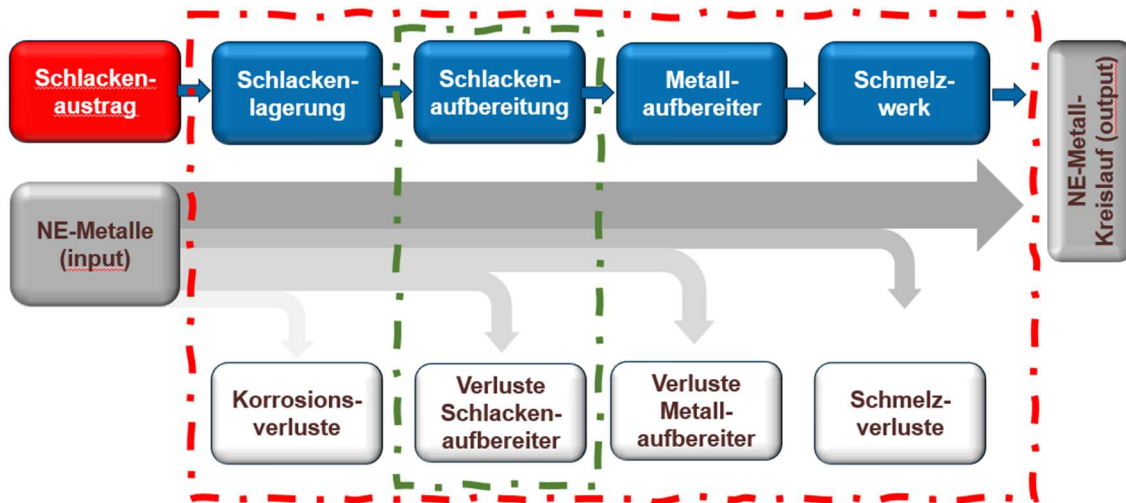


Abb. 1: Prozesspfad Metallrückgewinnung

Aber auch wenn das gesamte System (rote Systemgrenze) betrachtet wird, ist auf Grund der Inhomogenität der Schlacke und den tiefen Edelmetallgehalten in der Schlacke eine abschließende Beurteilung nur mit riesigem, nicht zurechtfertigendem Aufwand möglich.

Auch die Betrachtungsweise mit dem Gesamtwirkungsgrad

$$(\eta_{\text{Gesamt}} = \eta_{\text{Austrag}} \times \eta_{\text{Lagerung}} \times \eta_{\text{Schlackenaufbereitung}} \times \eta_{\text{Metallaufbereitung}} \times \eta_{\text{Metallschmelze}})$$

eignet sich nur bedingt für eine Beurteilungen, da der Wirkungsgrad für jede einzelne Metallart (Eisen, Aluminium, Kupfer, Blei, Edelmetalle, etc.) gemacht werden müsste, da sich die Massenströme der einzelnen Metalle um Faktoren unterscheiden. Für die Gewichtung der einzelnen Wirkungsgrade zu einem Gesamtwirkungsgrad wäre ein gemeinsamer Nenner sehr schwierig zu finden.

Die Erfahrung der letzten 10 Jahre haben jedoch gezeigt, dass die Schmelzanalyse der einzelnen ökologisch und ökonomisch relevanten Metalle und der anhand der Schmelzanalyse abgeleitete Metallertrag pro Tonne Schlacke die entscheidenden Kenngrößen für die Beurteilung des Schlackenaufbereitungsprozesses sind. Anhand der Schmelzanalysen lassen sich bis auf die Eisenfraktion die separierten Metallfraktionen berechnen und können entsprechend überprüfbar ausgewiesen werden. Für die Optimierung der Aufbereitungsanlage ist die Schmelzanalyse die wichtigste Kennzahl. Die Kenngröße, Metallertrag [CHF] pro Tonne Schlacke pro während einer definierten Betrachtungsperiode ist für die Gesamtbewertung des Prozesses geeignet.

1.2. Ökologische Bewertung der Metallrückgewinnung

Die Bewertung des aktuellen ökologischen Nutzens der Metallrückgewinnung aus trockener KVA-Schlacke der ZAV Recycling AG (Stand Ende 2024) wurde mit einer LCA der Abteilung Ecological Systems Design ESD der ETH Zürich und andererseits mit dem vom AWEL (Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft, Zürich) entwickelten Tool «Gesamtökologie KVA» beurteilt (vergleiche nachfolgende Tabelle). Für die LCA-Auswertung der ETH wurden über 4 Wochen statistisch gesicherte Schlackenproben gezogen (November 2024) und sämtliche separierten NE-Metalle nach der Schmelze über die Schmelzausbeute bewertet. Die Auswertung mit dem AWEL-Tool basiert auch auf der Schmelzausbeute, aber mit den Jahresdaten 2024 und den ökologischen Bewertungskriterien von 2013 und nicht analog zu LCA-Auswertung der ETH mit aktuellen Bewertungskriterien von 2021. Die Unterschiede in der nachfolgenden Tabelle können mehrheitlich auf die Unterschiede der Bewertungskriterien 2013/2021 zurückgeführt werden, d.h. die Resultate der beiden Auswertung auf gleicher Basis wären identisch. Die Tatsache, dass trotz unterschiedlichem Probenumfang (4 Wochen versus 12 Monate) die ökologische Bewertung identisch ist, zeigt eine gewisse Konstanz des Metallgehaltes in der Schlacke, aber auch eine Konstanz in der Aufbereitung.

Tab. 1: Vergleich Tool-ETH/Tool-AWEL

		ETH 2025	Umwelt-Tool AWEL *1)
CO ₂ -Einsparung	[CO ₂ equ/t _{Schlacke}]	760	704
UBP-Einsparung	[1000UBP/t _{Schlacke}]	2100	1474

*1) die Auswertung Umwelt-Tool-AWEL basiert noch auf den Bewertungskriterien von 2013

Die ökologische Bewertung der Metalle basiert auf der Differenz des ökologischen Aufwandes zwischen der Primär- und der Sekundärmetallproduktion. Damit verändert sich diese Bewertung, wenn neue Produktionsmethoden angewendet werden, oder der Aufwand der Primärproduktion zum Beispiel wegen tieferen Metallgehalt im Erz sich erhöht. Die nachfolgende Tabelle zeigt die relativen Unterschiede der Metallbewertung des Jahres 2013 zum Jahr 2021.

Tab. 2: Veränderung der Bewertungskriterien

Material	CO ₂ IPCC 2013 zu 2021 [%]	UBP 2013 zu 2021 [%]
Aluminium	0.3	58
Kupfer	24	47
Silber	25	50
Gold	195	26

Eine positive Zahl bedeutet, dass der ökologische Aufwand für die Primärgewinnung der Metalle im Jahr 2021 höher bewertet wurde als im Jahr 2013. Auffallend sind die grossen Veränderungen beim Gold. Da diese Metallbewertungen nicht jährlich nachgeführt werden, wird sich

die ökologische Beurteilung der Recyclingprozesse periodisch verändern und deswegen auch andere Werte ergeben.

Die höhere Bewertung der Sekundärgewinnung von Aluminium, Kupfer, Silber und Gold im Jahr 2021 zu dem Jahr 2013 zeigt die erwarteten Tendenzen klar auf, dass die Primärproduktion dieser Metalle immer aufwändiger und deren ökologischer Fussabdruck immer grösser wird. Im Umkehrschluss kann für die Zukunft von einem steigenden ökologischen Nutzen der abgeschiedenen NE-Metalle aus der Schlacke ausgegangen werden.

Da der ökologische Nutzen der Energiegewinnung aus der thermischen Verwertung von Abfällen wegen dem Verzicht auf fossile Energieträger in Zukunft abnehmen wird und der Umweltnutzen für die Rückgewinnung der Metalle aus der Schlacke in Zukunft signifikant zu nehmen, wird die Schlackenaufbereitung entscheidend für die ökologische Bewertung der thermischen Abfallverwertung sein, Dabei wird die Rückgewinnung der Edelmetalle eine ökologische und auch ökonomische Schlüsselrolle einnehmen.

Die Tatsache, dass sich die Abfälle in den letzten 30 Jahren vom Einzelmaterial zum Verbundwerkstoff entwickelt haben, wird in den aktuellen Recyclingprozessen kaum berücksichtigt. Obwohl heute bekannt ist, dass der thermische Prozess für die Rückgewinnung der NE-Metalle aus Verbundstoffabfällen äusserst effizient ist, wird ein grosser Teil der edelmetallhaltigen Abfälle immer noch mechanisch, mit einem tieferen Wirkungsgrad aufbereitet und damit wird auf ein grosses Potential der Kreislaufwirtschaft verzichtet.

2. Austrag von Trockenschlacke

2.1. Heutiger bewährter Entwicklungsstand

In den letzten 15 Jahren sind verschiedene Austragssysteme für Trockenschlacke entwickelt und eingesetzt worden. Das einfachste System basiert auf dem Stößel-Entschlacker, der ohne Wasser betrieben wird.

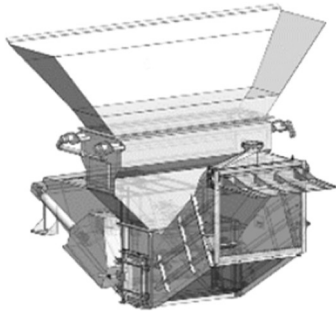


Abb. 2: Stößel-Entschlacker mit Anfahrklappe (Martin GmbH, München)

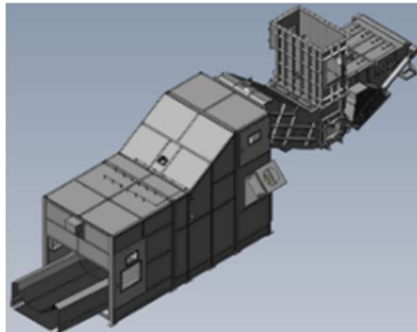


Abb. 3: Stößel-Entschlacker mit Staubabsaugung (Martin GmbH, München)



Abb. 4: Abzugsband mit Doppelklappe (Kanadevia Inova AG)

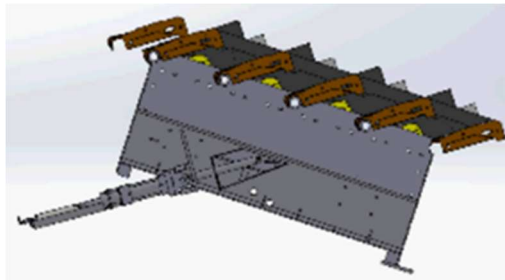


Abb. 5: „Grate for Riddling“ für die Separation der Schlacke kleiner 10 mm (Kanadevia Inova AG)

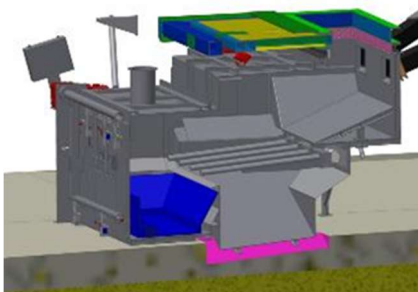


Abb. 6: Austrag mit Grobteilabscheidung und Absaugung von Tertiärluft (KEZO)

Bei all diesen Systeme wurde versucht mit Klappen und/oder Absauganlagen den Lufteintrag in den Ofenraum, der mit einem konstanten Unterdruck betrieben wird, bestmöglich zu verhindern. Einen kompletten Luftabschluss wie das mit Wasser beim Stössel-Entschlacker erreicht wird, konnte jedoch nicht gesichert realisiert werden. Für die Ofensteuerung war die Tertiärluft bzw. die Falschlufft kein wirkliches Problem. Die CO-Werte in den Rohgasen konnten weiter auf einem sehr tiefen und konstanten Niveau ($< 5 \text{ mg/Nm}^3$) gehalten werden, wobei sich das Rohgasvolumen je nach Fahrweise um relativ 2 bis zu 10% erhöhen konnte. Für ältere Anlagen mit grosszügig ausgelegten Rauchgaslinien und höheren O_2 -Werten im Feuerraum war dies kein Problem.

Trockenaustragsysteme haben folgende Vorteile:

- Guter Ausbrand der Schlacke: Der TOC in der aufbereiteten Schlacke ist seit Jahren kleiner 0.5 % (KEZO: 0.2%) und setzt damit den Benchmark bzw. ist der mess- und machbare Stand der Technik für die typisch schweizerische Abfallzusammensetzung.
- Tiefer DOC: Der mit dem TOC korrelierender DOC-Wert in der Schlacke ist kleiner 10 mg/l und entlastet dadurch die Deponien signifikant.
- PFAS-Werte: Auffallend, aber noch nicht statistisch gesichert, bei allen Proben liegen die PFAS-Werte unter der Nachweisgrenze
- Kein Wasserverbrauch und damit kein zusätzlicher Wasserdampf im Ofenraum (Energieverbrauch)
- Keine Ammoniak-Bildung in den Gebäuden
- Keine Gefahr von H_2 -Bildung im Entschlacker bzw. dessen Akkumulation (Explosionsrisiko)

2.2. Optimierung Luftabschluss mit Schlacke für zukünftige Herausforderungen

Für Neuanlagen mit tiefen O_2 -Werten und Rauchgasrückführung, aber auch im Hinblick auf die CCS-Technologie bei der ein möglichst hoher CO_2 -Gehalt in den Reingasen angestrebt wird, kommt dem Ofenabschluss eine signifikant höhere Bedeutung zu.

Für viele der Betreiber von thermischen Abfallverwertungsanlagen war der fehlende garantierte Luftabschluss neben möglichen Staubemissionen und der erwartete grössere CAPEX eines der Haupthindernisse, um den Schlackenaustrag von nass auf trocken umzustellen.

Für die Entwicklung eines neuen Trockenaustrags hatte daher ein garantierter Luftabschluss höchste Priorität. Die nachfolgenden Anforderungen sollten durch einen neuen Austrag erfüllt werden:

- Abdichtung des Austrages gegen den Ofenraum mit einer Schlackensäule im Schlackenschacht
- Kontinuierlicher Austrag der Schlacke kontrolliert über die vorgegebene Höhe der Schlackensäule
- Geschlossenes System (staubfrei)
- Optimale Verteilung der Schlacke auf dem Austragsband (keine Schlackenanhäufungen), um eine optimale Abkühlung und zum Teil auch einen besseren Ausbrand der Schlacke (tiefer TOC) auf dem Transportband zu erzielen
- Kontinuierliche Beschickung der nachfolgenden Transportbänder

- Gute und sichere Zugänglichkeit, um Verstopfungen auf Grund von Grossteilen beheben zu können
- Temperatur und feuerresistente Ausführung
- Robuste Ausführung für hohe Schlagenergie
- Der Austrag muss bei Bedarf leer gefahren werden können (selbstleerend)
- Minimale Bauhöhe des Austragsorgan, um maximale Höhe der Schlackensäule zu erzielen
- Temperaturüberwachung
- Kameraüberwachung
- Tiefer Energieverbrauch
- Minimaler Unterhaltsaufwand

2.3. Realisation des Austrages

Ein dichter Austrag ist mittel- und langfristig wohl nur zu garantieren, wenn die Abdichtung unmittelbar im oder nach dem Schlackenschacht in einem geschlossenen System stattfindet, wie das beim Nassaustrag praktiziert wird. Auf Grund der Eigenschaften der Schlacke (grosse Schlackenbrocken, Staub, Metallteile, etc.) kann mit dem Einsatz von einem mechanischen Trennsystem die Dichtigkeit höchstens kurzfristig garantiert werden.

Mit dem bestehenden Trockenschlackenaustrag der Ofenlinie 2 in der KVA Hinwil (vergl. Abb. 7) auf der Basis von Vibrationsrinnen wurden im Vorfeld Versuche gefahren die Schlacke im Schlackenschacht aufzustauen. Es hat sich jedoch gezeigt, dass mit der bestehenden Konfiguration kein zuverlässiger Abtransport der Schlacke möglich ist. Die Tatsache, dass nur ein kleiner Teil der Schlackensäule auf der Vibrationsrinne stand, war sicher ein Grund für den unzuverlässigen Abtransport der Schlacke.

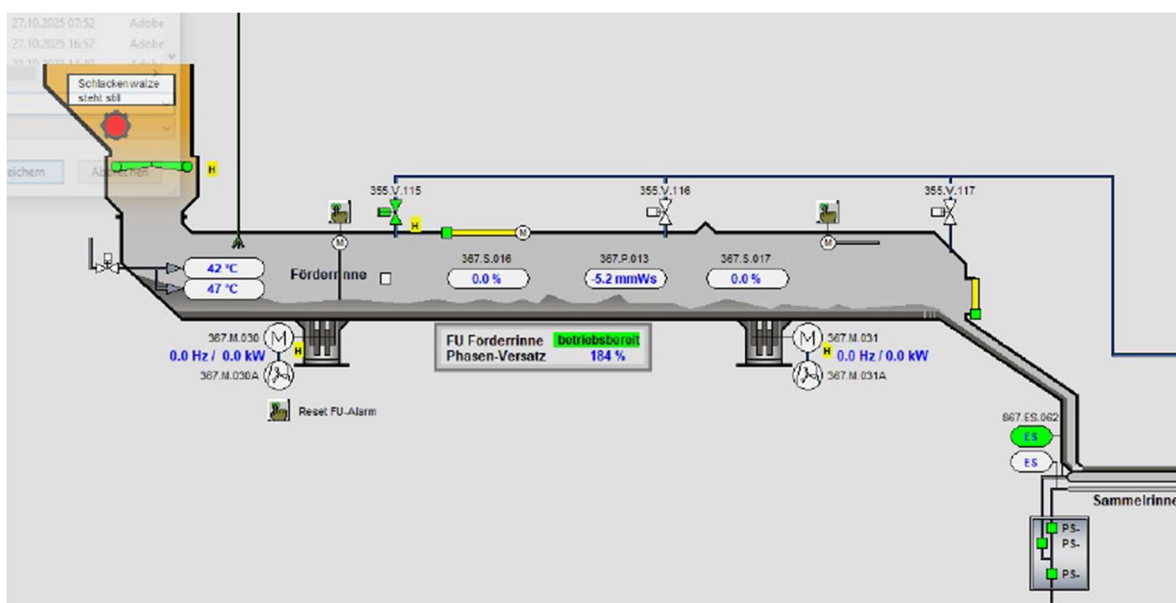


Abb. 7: Trockenschlackenaustrag mit Vibrationsrinne

Weiter wurden in dem 20-jährigen Betrieb des Trockenaustrags mit Vibrationsrinnen folgende Schwachstellen festgestellt:

- Abdichtungen zwischen dem beweglichen und festen Teilen ist aufwändig und sind potenzielle Quellen für Staubleckagen
- Vibrationen werden ins Gebäude übertragen
- Bei der Konfiguration mit nicht schwingender Abdeckung ist mit starker Pulsation zu rechnen und beim gleichzeitigen Betrieb von mehreren Linien bzw. Vibrationsrinnen sind diese aufeinander abgestimmt zu betreiben, damit die Pulsation nicht zu gross wird (aufwändige Steuerung).

Auf Grund dieser Erkenntnisse wurde mit der Firma Magaldi zusammen entschieden, ein neues System zu entwickeln, welches die Anforderungen unter Absatz 2.1 erfüllt.

Ende November 2024 wurde während der ordentlichen Revision der Ofenlinie 2 in der KVA Hinwil das Magaldi-Band (spezielles Plattenband mit Stahlplatten) eingebaut und in Betrieb genommen. Die Geschwindigkeit des Magaldi-Bandes wurde dabei über eine konstante Höhe des Schlackensäule geregelt.

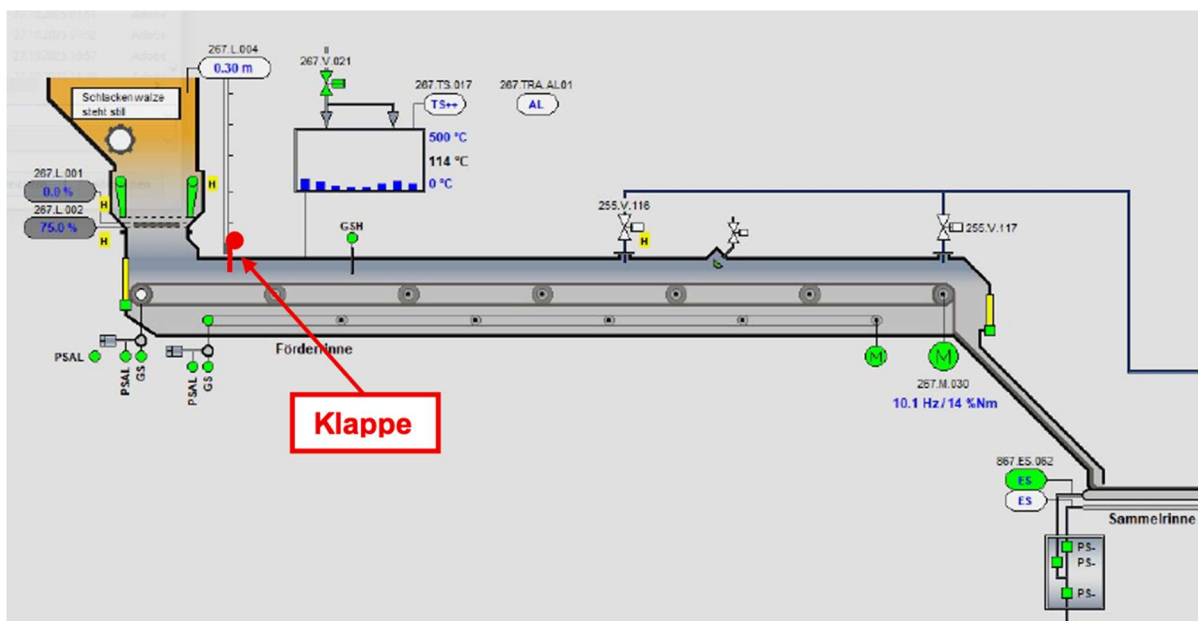


Abb. 8: Trockenschlackenaustrag mit Magaldi-Band mit Klappe zur Reduktion der Schlackenhöhe auf dem Transportband

Erkenntnisse durch den Betrieb der Anlage:

- Man ist davon ausgegangen, dass die Schlacke einen Schüttkegel auf dem Transportband bildet und so die Schichtdicke der Schlacke kontinuierlich bis zum Austritt abnimmt. Dies hätte den grossen Vorteil gehabt, dass auch ein Teil der horizontalen Bandstrecke als Abdichtung (Teil der Schlackensäule) genutzt werden hätte können. Damit hätte man die Bauhöhe signifikant reduzieren können (vergleiche Abb. 9). Im Betrieb musste jedoch festgestellt werden, dass sich eine Pfropfenströmung bildet, welche bei der ersten Höhenreduktion des Bandes zu Verstopfungen führte. Die Pfropfenbildung ist unter anderem auch

der Tatsache geschuldet, dass die Schlacke der KEZO auf Grund der Abfallzusammensetzung sehr grob ist.

Abdichtung mit Schlacke

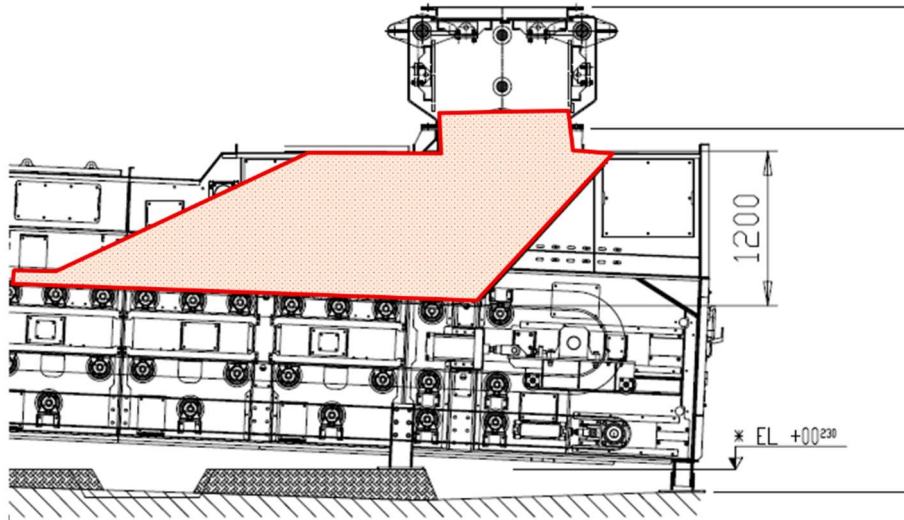


Abb. 9: Abdichtung mit Schlackenkegel

Um dieses Problem zu beheben, wurde eine schwenkbare Klappe mit Gegengewichten eingebaut, welche sich je nach Schlackendruck mehr oder weniger öffnet. Die Klappe ist leicht zurück versetzt zum Schlackenkanal eingebaut und verlängert damit den Schlackenkanal, wobei die seitliche Abdichtung auf Grund der Klappenfunktion nicht luftdicht ausgeführt werden kann. Die Klappe kann bei Verstopfungen geöffnet werden, so dass ein grosser Teil des Schachtes von Schlacke leer gefahren werden kann.

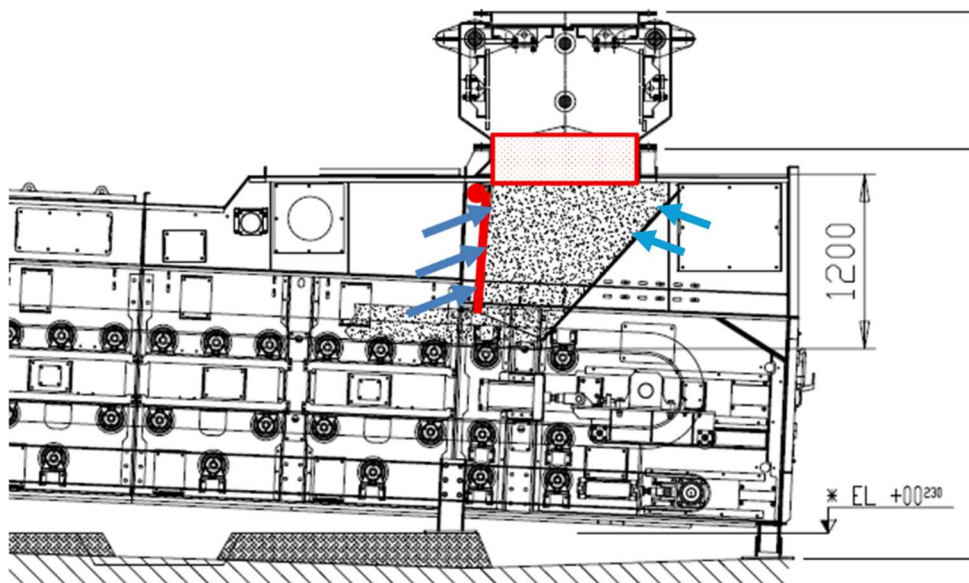


Abb. 10: Schlackenschacht mit Klappe

- Da die Klappe seitlich nicht abgedichtet werden kann (blaue Pfeile) und die Prallplatte seitlich nicht verschweisst ist, reduziert sich die abdichtende Schlackensäule (rote Fläche) auf ca. 30 cm, was sehr wenig ist. Auf Grund der sehr groben Schlacke der KEZO ist die Schlackensäulenhöhe von 30 cm ungenügend, um den Luftabschluss zwischen Ofenraum und Austrag garantieren zu können. Könnte man die Klappe durch einen Schieber ersetzen, könnte die Schlackensäulenhöhe um weitere ca. 60 cm erhöht werden, was die Abdichtung zum Ofenraum signifikant verbessern würde.



Abb. 11: relativ feine Schlacke unmittelbar nach der Klappe

Abb. 11: relativ grobe Schlacke unmittelbar nach der Klappe

- Weiter wurde festgestellt, dass es öfters zu Verstopfungen im Schlackenschacht kommt, verursacht meistens durch grosse Eisenteile (Gestelle, Eisenträger, Metalltüren, etc.), welche sich querstellen und damit den Schlackenfluss stören. Solche Verstopfungen können grösstenteils vermieden werden, wenn der Schlackenkanal im Bereich der Schlackensäule gegen unten mit einem Winkel von $3^\circ - 5^\circ$ geöffnet wird.

Tab. 3: Zusätzlicher Platzbedarf infolge Öffnungswinkel Schlackenschacht

	zusätzliche Breite/Länge durch konischen Schlackenschacht [cm]	Öffnungswinkel Schlackenschacht			
		2 [°]	3 [°]	4 [°]	5 [°]
Länge Schlackenschacht	150 [cm]	10.5	15.7	21.0	26.2
	200 [cm]	14.0	21.0	28.0	35.0
	250 [cm]	17.5	26.2	34.9	43.7

Die Tabelle zeigt den zusätzlichen Platzbedarf der konischen Öffnung jeweils auf zwei gegenüberliegenden Wänden. Da der Platz in Abzugsrichtung meistens wenig begrenzt ist, wäre in dieser Richtung gegen hinten und vorne ein Öffnungswinkel von 5° optimal, was zu einer Verlängerung dies Abzugsbandes von rund 43.7 cm bei einer Schlackenschachtlänge vom 2.5 m zur Folge hätte. In Querrichtung wären 2° ausreichend, was zu einer

Verarbeitung des Abzugsbandes von rund 26.2 cm führen würde. Ein breiteres Abzugsband hätte weiter den Vorteil, dass sich die Verweilzeit der Schlacke auf dem Band verlängert und diese dadurch noch zusätzlich abgekühlt wird.

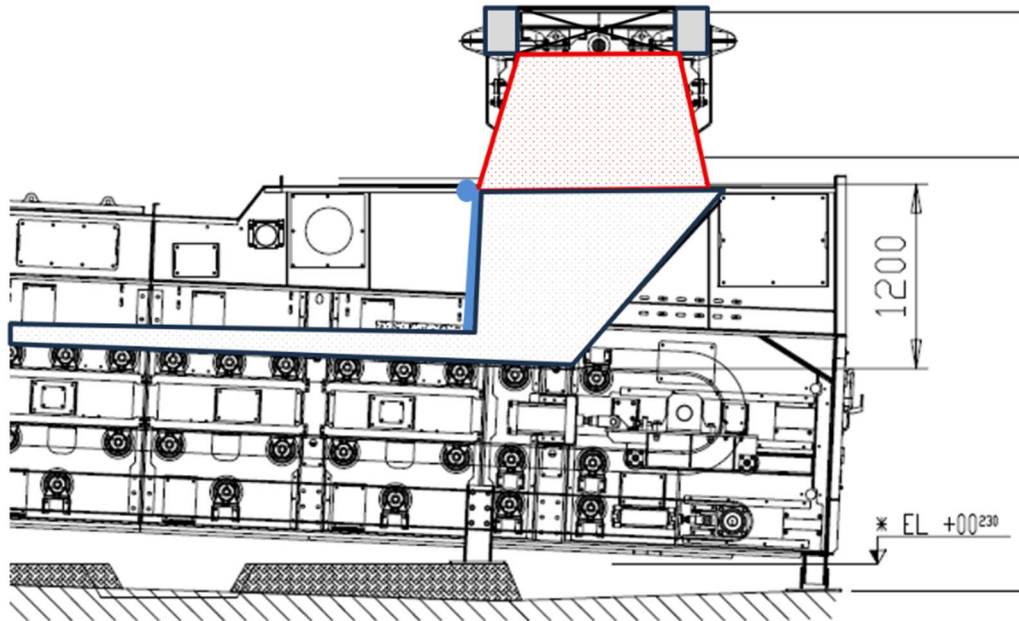


Abb. 13: Optimierung der Höhe der Schlackensäule mit Schieber statt Klappe und angepasstem Schacht

- Oberhalb des Schlackenschachts wurde eine Radarsonde in die Kesseldecke eingebaut (vergleiche Abb. 8), mit welcher die Säulenhöhe der Schlacke bestimmt werden kann. Nach einer Betriebsdauer von einem Jahr kann die Messung als sehr stabil und zuverlässig beurteilt werden. Die Schlackenhöhe wird hauptsächlich für die Steuerung der Bandgeschwindigkeit des Magaldi-Transportbandes verwendet und garantiert dadurch eine konstante Säulenhöhe der Schlacke im Schlackenschacht und damit die Dichtheit zum Ofenraum. Weitere Vorteile dieser Konfiguration sind:
 - Maximale Verweilzeit und damit auch maximale Abkühlzeit der Schlacke auf dem Magaldi-Band in Abhängigkeit der produzierten Schlackenmenge
 - Nimmt die Höhe der Schlackensäule trotz laufend erhöhter Geschwindigkeit des Transportbandes zu, so liegt eine Verstopfung im Schlackenschacht vor. Der Schlackenschieber/Klappe muss geschlossen werden und das Magaldi-Band wird geleert, um die Verstopfung zu lösen.
 - Eine nicht kontinuierliche, grosse Veränderung der Säulenhöhe weist zusätzlich auf grosse Metall- oder Schlackenteile hin und kann im Prozessleitsystem als Alarm hinterlegt werden.

- Zusätzlich wurde oberhalb des Schlackenschachts eine Kamera in die Kesseldecke eingebaut, um die Oberfläche der Schlackensäule (Abb. 14) zu beobachten und die Luftzugverhältnisse im Schlackenschacht zu beurteilen. Die Kamera dient auch zur frühzeitigen Erkennung von grossen Störstoffen.

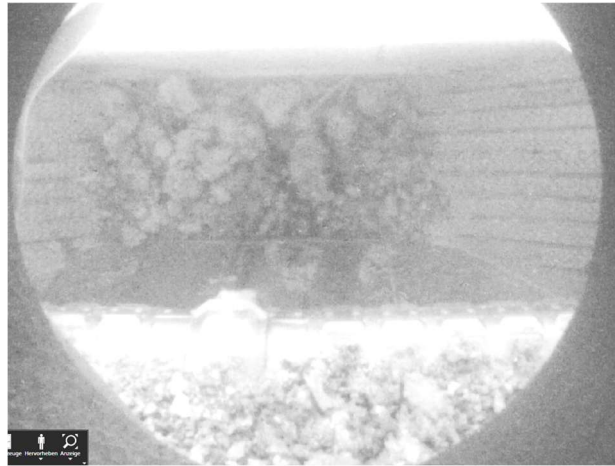


Abb. 14: Blick auf die Schlackensäule

Sobald Schlacke über die Schlackenwalze geschoben wird und auf die Schlackensäule fällt, kann mittels der Staubentwicklung im Schacht beurteilt werden, ob die Schlackensäule zu klein ist und der Staub in den Ofen zurückgezogen wird oder die Abdichtung gut ist und der Staub von der Schwerkraft absinkt.

- Weiter ist es empfehlenswert eine kleine seitliche Öffnung (Abb. 15) beim Austrag vorzusehen, durch die, nachdem Schliessen der Klappe und Leerfahren des Transportbandes die Verstopfung mit einer Stange gelöst werden kann.



Kleine Öffnung zum Lösen von Verstopfungen

Abb. 15: Kleine Öffnung zum Lösen von Verstopfungen

2.4. Auswertung und Fazit

Vom 1. Juni bis zum 15. September 2025 wurde ausgewertet wie sich die Verbrennungsluftmenge gemessen nach dem Elektrofilter (258.Q.086k) in Funktion der Klappenstellung verändert. Dabei wurde der Mittelwert der Luftmenge zwei Stunden vor dem Schliessen der Klappe verglichen mit dem Mittelwert der Luftmenge während der Zeit in der die Klappe geschlossen war, jeweils korrigiert um die Dampfmenge. Total wurden 134 Klappenschliessungen ausgewertet. Dabei wurden bei 70 Schliessungen der Klappen keine oder eine leicht erhöhte Luftmenge (Mittelwert der Erhöhung der Luftmenge um 3.7%) und bei 64 Schliessungen keine oder eine leichte Reduktion der Luftmenge (Mittelwert der Reduktion der Luftmenge um 3.3%) festgestellt.

Dieses stochastische Resultat weist auf die Tatsache hin, dass die effektive Höhe der Schlackensäule mit 300 mm (= 1500 – 1200 mm) zu klein ist, um eine zuverlässige Abdichtung garantieren zu können. Daher wäre der Ersatz der Klappe durch einen Schieber mit angepasstem Schacht (Abb. 10) zu empfehlen, damit eine Höhe der Schlackensäule von 900 mm erreicht werden könnte.

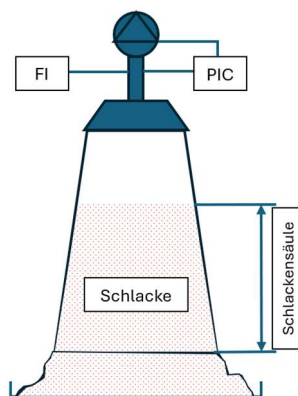


Abb. 16: Bestimmung der Höhe der Schlackensäule

Die Bestimmung der Höhe der Schlackensäule für einen Luftdichtenabschluss zwischen Ofen und Austrag, ist eine Funktion der Schlackekorngrößenverteilung. Da die praktischen Erfahrungen fehlen, drängt sich der Bau einer einfachen Versuchsanordnung auf, mit der die minimale benötigte Schlackensäulenhöhe bestimmt werden kann. Die Abbildung 16 zeigt eine mögliche Anordnung, um die benötigte Schlackensäulenhöhe zu bestimmen. Da die Temperatur der Schlacke beim Austrag in der Regel kleiner 75°C ist können thermische Effekte vernachlässigt werden. Damit kann ein einfacher Schacht ausserhalb der Ofenanlage mit Schlacke gefüllt werden. Über einen geregelten Ventilator wird der Unterdruck oberhalb der Schlackensäule auf ca. – 5 mbar (Ofendruck) geregelt und über eine Luftmengenmessung wird die Dichtheit bestimmt. Mit dieser Versuchsanordnung

könnten auch der optimale Öffnungswinkel im Schlackenschacht bestimmt werden und auch Konzepte für das Lösen von potenziellen Verstopfungen erarbeitet werden.

3. Aufbereitung von Schlacke

Die Gründe die Schlacke aus der thermischen Verwertung trocken auszutragen sind vielseitige. In diesem Kapitel wird im Detail auf die Vorteile der Trockenschlacke beim Aufbereitungsprozess und die Einflussgrößen der Separation von NE-Metallen eingegangen und.

3.1. Trockenschlacke

Eine trocken ausgetragene Schlacke lässt sich wie ein trockenes Schüttgut verarbeiten. Die Rieselfähigkeit der Trockenschlacke ist der Garant für eine industrielle vollautomatische Aufbereitungsanlage und damit auch für eine hohe und gleichmässige Qualität, der aus der Schlacke separierten metallischen und mineralischen Produkten. Das Fehlen von Wasser führt zu folgenden Vorteilen:

- Kein Wasserverbrauch
- 15 - 25% weniger Schlackenmasse
- Die Schlacke hat einen konstanten Wassergehalt von kleiner 0.1%.
- Keine zusätzliche physikalische Vermischung von mineralischen und metallischen Fraktionen
- Industriell fraktionierbar (beliebig fein)
- Vernachlässigbare Korrosion der Metalle in der Schlacke
- Keine H₂-Bildung
- Keine Korrosion im Austragsorgan/direkten Umgebung und in der Aufbereitungsanlage (lange Abschreibungsdauer)
- Keine Ammoniakbildung in der Anlage
- Schlacke kann ohne Zwischenlager direkt ab Austrag verarbeitet werden.
- Schlacke kann beliebig lang gelagert werden, ohne negative Effekte bzgl. Wertstoffrückgewinnung (Korrosion, Verbackungen).
- Trocken ausgetragene Schlacke ist prozessbedingt in der Regel gut ausgebrannt und hat daher einen tiefen organischen Anteil (TOC), der die Aufbereitung und die Mineralik nicht unnötig belastet und bzgl. der Verwertung von Metallen und Mineralien auch tiefere Emissionen zur Folge hat.
- Die Trockenschlacke kann jederzeit nach Bedarf befeuchtet werden
- Keine Wasseraufbereitung/Abwasser

Der Tatsache, dass die Trockenschlacke im Handling Staubemissionen generiert, ist eine Herausforderung an die Prozessführung, führt aber schlussendlich bei konsequenter Anwendung von geschlossenen Systemen zu einer sauberen, wartungsarmen und effizienten Schlackenaus- und Aufbereitungsanlage. Die MAK-Wert (Maximale Arbeitsplatzkonzentration) können damit beim Austrag und der Aufbereitung problemlos eingehalten werden.

Aufgrund unserer Erfahrungen gehen wir davon aus, dass Trockenschlacke abrasiver als Nassschlacke ist, da Wasser als Schmierstoff fehlt. Durch den Einsatz von spezifischen für die Schlackenfraktion massgeschneiderten Materialien und auch Transportsysteme konnte, die durch Abrasion nötig werdenden Instandhaltungsarbeiten in den letzten Jahren signifikant reduziert werden.

3.2. Abscheidung von Nichteisen (NE) Metallen

3.2.1. Abstosskräfte auf NE-Metalle

Die NE-Metalle werden in sogenannten Wirbelschichtabscheidern (Eddy current separator) mit Hilfe von Induktionskräften aus der Schlacke separiert. Entscheidend ist daher die Grösse der Abstosskraft (=Induktionskraft bzw. Van-der-Waals-Kräfte), die auf das einzelnen NE-Metallteil wirkt. Nachfolgend werden die maschinenspezifischen Einflussfaktoren aufgelistet:

a) Induktionsabscheider: Die Magnettrommel ist entscheidend für das maximale Potential des Induktionsfeldes und damit auch für die Abstosskräfte. Es gilt dabei folgende maschinenspezifischen Eigenschaften zu berücksichtigen bzw. zu optimieren:

- Anordnung/Anzahl und Stärke der Magnete
- Durchmesser der Magnettrommel
- Zentrische oder exzentrische Anordnung der Magnettrommel
- Wanddicke und Material des Stützmantels
- Distanz zwischen dem Stützmantel und der Laufrolle
- Wanddicke und Material der Laufrolle
- Banddicke des Transportbandes
- Gefälle des Transportbandes

In vielen Anwendungsfällen vor allem im Zusammenhang mit Nassschlacke können die maximal möglichen Abstosskräfte nicht genutzt werden, da aus betrieblichen Gründen Kompromisse gemacht werden.

b) Weiter sind die folgenden Maschineneinstellparameter zu berücksichtigen:

- Umfanggeschwindigkeit der Magnettrommel
- Drehrichtung der Magnettrommel abhängig von der Partikelgrösse
- Geschwindigkeit des Transportbandes
- Stellung des Scheitel- bzw. Trennbleches

c) Aber auch die Art wie der NE-Abscheider eingesetzt wird, ist aus den folgenden Gründen entscheidend:

- das Spektrum der Korngrössenverteilung der Schlacke sollte nicht zu gross sein
- der Durchsatz durch den NE-Abscheider sollte konstant sein und nicht vom vorgelagerten Siebprozess abhängen
- eine gleichmässige, gut über die Bandbreite verteilte Materialbeschickung ist entscheidend und bestimmt den Anlagedurchsatz und die Abscheideeffizienz.

d) Eine grosse Bedeutung hat die Feuchte der Schlacke:

- Die Adhäsionskräfte zwischen der feuchten Schlacke und dem Transportband wirken den Induktionskräften entgegen und reduzieren dadurch die Abstosskräfte auf die NE-Metalle

- Die Adhäsionskräfte zwischen der feuchten Schlacke und den NE-Metallen gebildet durch chemische und physikalische Reaktionen beim Kontakt der Schlacke mit Wasser, wirken den Induktionskräften entgegen und reduzieren dadurch die Abstosskräfte auf die NE-Metalle
- Feuchte Schlacke neigt dazu an den materialführenden Flächen anzuhaften und stört damit die Materialverteilung auf dem Transportband des NE-Abscheider und damit auch die Effizienz der Metallabscheidung
- Feuchte Schlacke neigt zu Schlackenbackungen auf dem Transportband, was auf Grund des grösseren Abstandes der Metallteile zur Induktionsquelle die Abstosskraft signifikant reduziert
- Die Feuchte der Schlacke ist nicht konstant, was zu stetig ändernden Betriebsbedingungen führt und die Konstanz des NE-Separationsprozesses empfindlich stört und damit die Effizienz der Metallabscheidung reduziert.

Mit Abstand der grösste Einfluss auf die Abstosskräfte hat die mineralische Schicht, die jedes Metallteil aus der nass ausgetragenen Schlacke umhüllt und wie ein Isolator das Induktionsfeld schwächt und damit auch die Abstosskraft. Im nachfolgenden Bild sieht man auf der linken Seite schwere NE-Metalle separiert aus der nass ausgetragenen Schlacke und rechts die gleiche Fraktion aus der Trockenschlacke.



Abb. 17: NE-Metalle separiert aus Nassschlacke (links) und Trockenschlacke 1

Bei Aluminium sind die oben beschriebenen Einflussgrössen weniger entscheidend als bei den Edelmetallen, die auf Grund ihres hohen spezifischen Gewichts viel grössere Abstosskräfte benötigen, um zur Separation über das Scheitelblech des NE-Abscheiders gestossen zu werden.

Die Abbildungen 18 zeigen den Unterschied der Abstosskräfte, die in einem identischen Induktionsfeld auf die NE-Metalle wirken. Auf der linken Seite NE-Metalle aus dem Nassaustrag. Auf der rechten Seite NE-Metalle aus dem Trockenausstrag



Abb. 18: Abstosskräfte von nassen und trockenen NE-Metallen

3.2.2. Herausforderungen bei der Induktionsabscheidung von NE-Metallen

Die Abscheidung von NE-Metallen mit Hilfe eines Induktionsfeldes basiert auf der elektrischen Leitfähigkeit und der Dichte der einzelnen NE-Metalle. Vereinfacht kann gesagt werden, dass die Multiplikation der elektrischen Leitfähigkeit mit der Dichte des NE-Metalls die Abstosskraft definiert, welche für die Separation der Metalle und damit für die Rückgewinneffizienz entscheidend ist. Da Aluminium eine 7-mal kleinere Dichte als Gold hat und die elektrische Leitfähigkeit von Gold nur gerade 20% höher ist als beim Aluminium, wirken wesentlich höhere Kräfte auf das Aluminium als auf ein Gold- oder auch Kupferteilchen. Dadurch ist Aluminium viel einfacher abzuscheiden als die Edelmetalle inkl. Kupfer. Die Physik lässt sich auch mit der Optimierung sämtlicher Parameter, wie unter Abschnitt 3.2 beschrieben wird nicht überlisten.

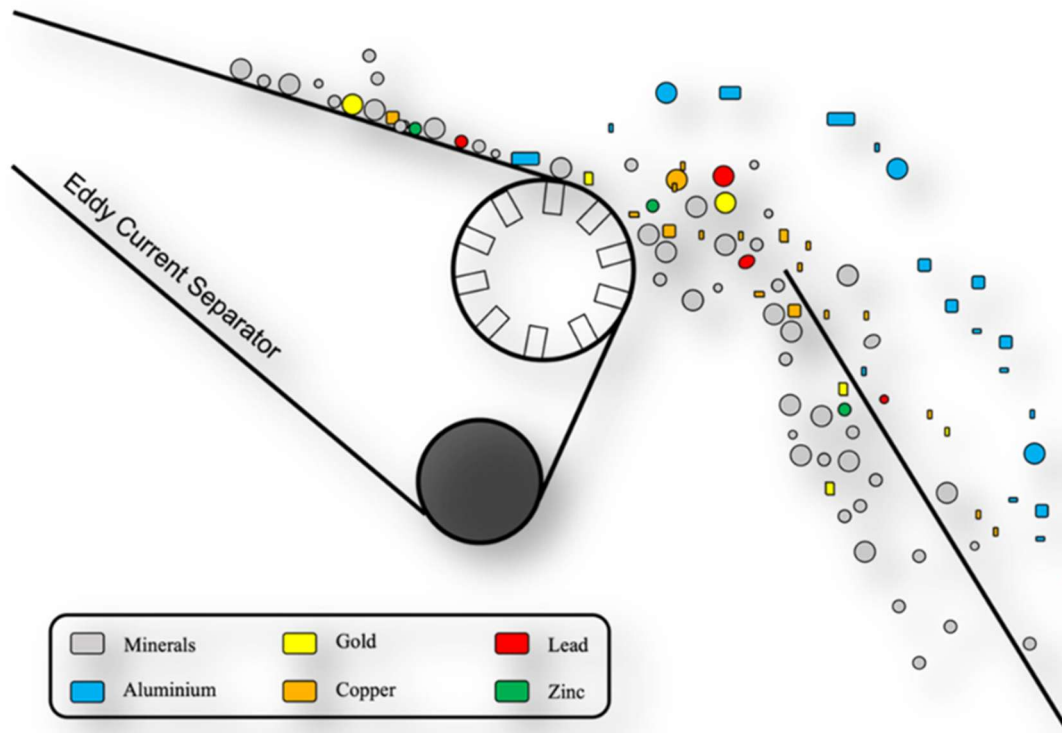


Abb. 19: Schlacken- und Metallabscheidung

Will man die ökologisch und ökonomisch wertvollsten Edelmetalle oder wenigstens einen grossen Teil davon mit dem NE-Abscheider separieren, so muss der NE-Abscheider sehr «scharf» eingestellt werden, was wiederum dazu führt, dass neben den NE-Metallen auch Schlacke separiert wird. Die Abbildung 19 zeigt die Problematik der Abstossung der NE-Metalle. Aluminium (blaue Teilchen) werden bereits früh vom Induktionsfeld erfasst und von den hohen Induktionskräften hoch über das Scheitelblech geschleudert. Im Gegensatz zu Gold, Silber, Kupfer und Blei, die durch die Induktionskräfte nur eine kleine Ablenkung erfahren und so nur zu einem kleinen Teil den Weg über das Scheitelblech finden. Sollen mit einer sehr «scharfen» Einstellung auch die Edelmetalle in grösserem Umfang separiert werden, so erhöht sich der Anteil Schlacke in den NE-Metallen auf 40 – 60%. NE-Metalle mit einem hohen Schlackenanteil (=Verunreinigungen) können nicht direkt ins Schmelzwerk geliefert werden, d.h. diese NE-Metalle müssen nochmals aufbereitet werden.

Diese zusätzliche Aufbereitung (Reinigung durch Zerkleinerung, z.B. Mahlung) führt dazu, dass wiederum ein bedeutender Anteil der Edelmetalle in die Staubfraktion der Aufbereitungsanlage durch Abrieb verschoben wird und damit dem Metallkreislauf verloren geht. Da der Goldanteil im NE-Metall/Schlackengemisch nur gerade ca. 1/50'000 ausmacht, kann dieser durch die angewandte Probennahme und Probeaufbereitung nicht mit finanziell vertretbarem Aufwand zuverlässig bestimmt werden und geht bei der Bilanzierung verloren.

Um möglichst viele der ökologisch und ökonomisch relevanten NE-Metalle zu separieren und gleichzeitig eine hohe NE-Metall Qualität zu garantieren, wurde im Jahr 2023 das nachfolgende optimierte Anlagekonzept entwickelt und auch umgesetzt:

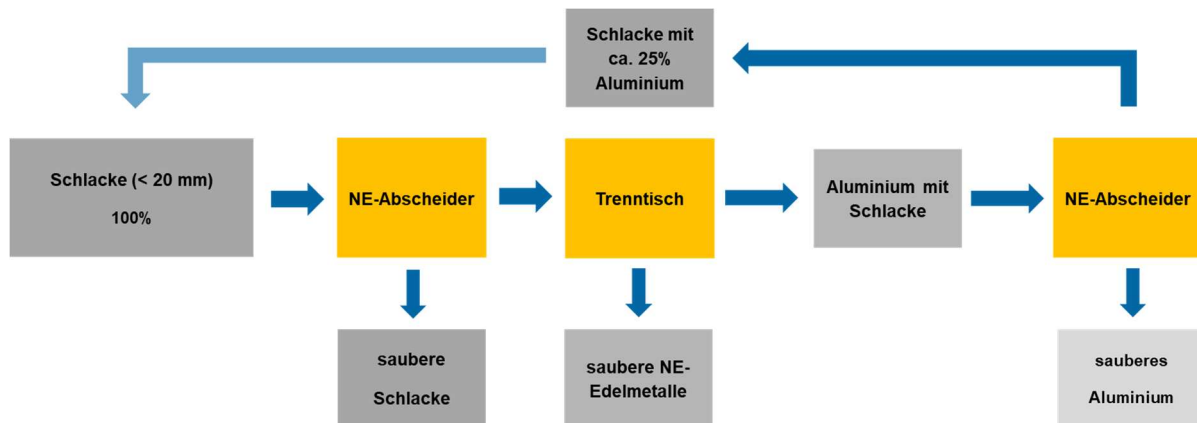


Abb. 19: Reinigung der Aluminiumfraktion

Die vom NE-Abscheider «scharf» eingestellte separierten NE-Metalle werden direkt einer Dichtentrennung mit Trenntischen zugeführt. Da die Dichte von Aluminium und Schlacke sehr ähnlich ist, wird die Schlacke mit dem Aluminium zusammen von den wesentlich schwereren Edelmetallen separiert. Das Aluminium mit der Schlacke wird einem weiteren NE-Abscheider zugeführt. Dieser NE-Abscheider 2 ist so eingestellt, dass dieser einerseits ein sauberes Aluminium separiert und andererseits eine Schlacke mit einem Aluminiumanteil von ca. 25%. Damit dieser Anteil von 25% Aluminium nicht verloren geht, erfolgt die Rückführung dieser Schlacken-Aluminiumfraktion in den Prozess. Es wurde festgestellt, dass die zurückgeführte Schlacken-Aluminiumfraktion mit Vorteil vor einem Brecher wieder in den Prozess zurückgeführt wird, um das Aluminium von Schlackenabackungen zu befreien. Die Schmelzausbeute von Aluminium der Fraktion 1 – 15mm (sauberes Aluminium) konnte mit diesem Verfahrensschritt um über 10% auf rund 80% erhöht werden. Das Feedback der Aluminium Schmelzer war äußerst positiv. Folgende Vorteile sehen sie in der neuen Aluminiumqualität:

- 1) Hohe Schmelzausbeute
- 2) Konstante Aluminiumqualität auf hohem Niveau
- 3) Keine Emissionen beim Schmelzprozess im Gegensatz zu Aluminiumfraktionen aus dem stofflichen Recycling. Die Emissionen beim recycelten Aluminium durch die Organik, dem Plastik und auch die Farbstoffe begrenzen den Mengenanteil, welcher der Schmelzer an recyceltem Aluminium einsetzen kann.

Durch die Reinigung der Aluminiumfraktion können die ersten NE-Abscheider der Fraktionen 1 – 15 mm wesentlich schärfer eingestellt werden. Damit erhöht sich der Schlackenanteil im NE-Metall signifikant und es können dadurch über 10% mehr NE-Edelmetalle separiert werden. Entsprechend reduziert sich der Restmetallgehalt in der aufbereiteten Schlacke. Zusammenfassend bringt die durchgeführte Prozesserweiterung eine signifikante ökologische und

auch ökonomische Verbesserung des gesamten Schlackenaufbereitungsprozess, da signifikant mehr Edelmetalle (Au, Ag, Cu, Pa, etc.) in den Metallkreislauf zurückgeführt werden können.

3.3. Optimierung des Scheitelblechs bei den NE-Abscheider

Bei der Abscheidung der feinen Metalle mit dem NE-Abscheider können keine metallische Scheitelbleche verwendet werden. Da sich diese wegen der Nähe zum Induktionsfeld, sehr stark aufheizen. Bei den aus Kunststoffen hergestellten Scheitelbleche waren die Standzeiten sehr kurz und der Tausch von Scheitelblecken ist aufwändig. Aus diesem Grund wurden verschiedene Materialien getestet. Das Scheitelblech wurde so aufgebaut, dass nur gerade der Scheitel gewechselt werden muss. Dies führt einerseits zu kurzen Wechselzeiten und andererseits muss das Scheitelblech nicht neu eingestellt werden. Mit Scheiteleinsätzen aus Keramik hat man schliesslich das Material gefunden, mit welchem beim Feinkorn sehr lange Standzeiten (> 1 Jahr) garantiert werden können.

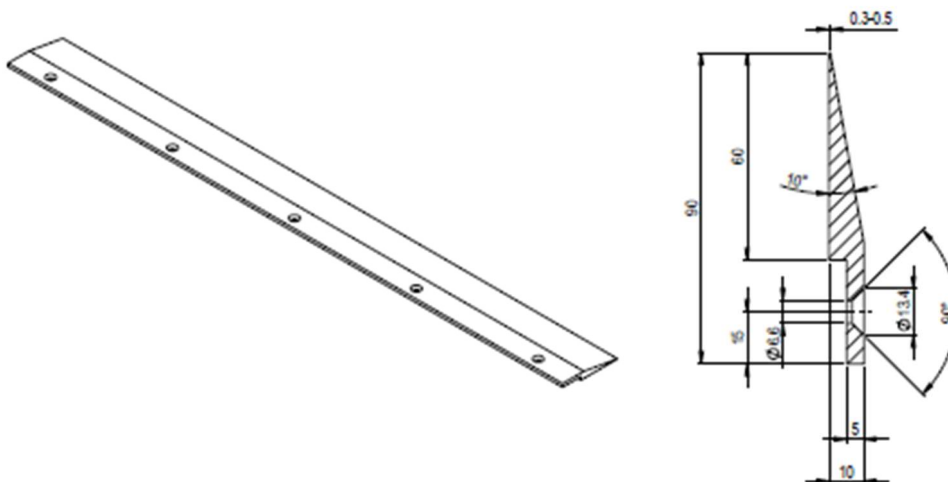


Abb. 20: Einsatz für Scheitelblech

3.4. Herausforderungen und Optimierungen bei der Eisenabscheidung

Die Separation der Eisenfraktion (FE) aus der Trockenschlacke erfolgte bis 2023 nach dem Stand der Technik mit einem Überbandmagneten. Durch den Trockenausstrag ist das Eisen bereits sauber, aber die wenigen Schlackenanhafungen zerfallen beim Handling des Eisens (Zwischenlagerung, Laden und Entladen der LKW, Handling im Schmelzwerk) teilweise und generieren Staubemissionen. Zudem findet man immer wieder Hohlkörper, die mit Schlacke gefüllt sind und den Anteil Schlacke in der FE-Fraktion erhöhen. Um Staubemissionen zu vermeiden und die lose Schlacke abzutrennen, wurde im Jahr 2023 unmittelbar nach dem Überbandmagnet ein Trommelsieb mit einem 3-D-Siebbelag installiert, d.h. die Eisenfraktion rutscht über eine Schurre direkt ins Schmelzwerk.

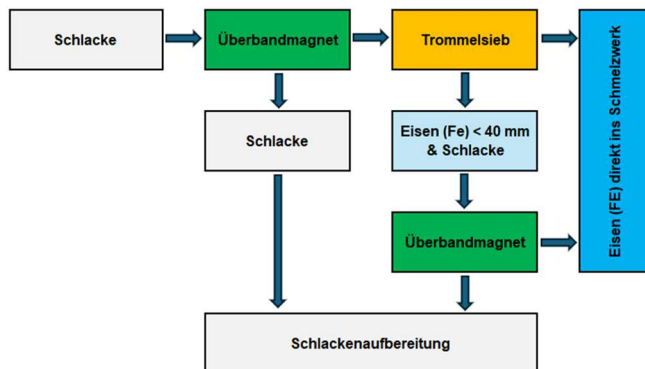


Abb. 21: Schema Eisenaufbereitung optimiert

Die Eisenfraktion rutscht über eine Schurre direkt ins Schmelzwerk. Durch die mechanische Belastung im Trommelsieb werden die noch vorhandenen Schlackenanhafungen abgeschlagen. Bei einer Siebung von 40 mm wird Feinschlacke, aber auch Feineisen im Trommelsieb abgesiebt. Diesem

Massenstrom wird mit einem weiteren kleinen Überbandmagnet das Eisen entzogen und die Schlacke wird zurück in die Schlackenaufbereitung geführt. Mit dieser Anlagekonfiguration wird seit dem Jahr 2023 eine «staubfreie» Eisenfraktion produziert, die direkt ins Schmelzwerk geliefert werden kann. Das Trommelsieb mit dem 3D-Siebbelag hat sich für diese Anwendung bestens bewährt und der Reinigungsaufwand am Belag selbst ist minimal und daher bestens geeignet für den 24-Stundenbetrieb.

3.5. Siebtechnik

Die äusserst positiven Erfahrungen mit dem Trommelsieb für die Reinigung der Eisenfraktion haben die Vorteile des Trommelsiebs gegenüber den bisher eingesetzten Kreisschwingsieben aufgezeigt. Die Anwendung von Trommelsieben in der Aufbereitung von Trockenschlacke für mittelgrosse-grosse Körngrößen haben den Siebprozess wesentlich vereinfacht, sind zuverlässiger und günstiger in der Investition und der Instandhaltung. Das Trommelsieb zeichnet sich gegenüber dem Kreisschwingsieb durch folgende Vorteile aus:

- Mehrere Fraktionen können mit einer Maschine abgesiebt werden, mit einem wesentlich besseren Zugang zu den Siebbelägen bzw. Überwachung der Siebbeläge, wie dies bei den Mehrdecksieben nur eingeschränkt möglich ist.
- Die spezifische Siebbelastung kann zum Teil signifikant reduziert werden
- Der mechanische Impact auf die Schlacken-Agglomerate und Anbackungen an den Metallen ist bei der Verwendung von Mitnehmern grösser als bei den Kreisschwingsieben. Dadurch kann eine bessere Auftrennung der Fraktionen erreicht werden.
- Keine Übertragung von Vibrationen ins Gebäude

- Einfache Abdichtung der Schnittstellen
- Signifikant tieferer Energieverbrauch
- Tiefere Investitions-, Betriebs- und Instandhaltungskosten

Die nachfolgenden Bilder zeigen den Aufbau eines aktuellen Trommelsieb für zwei Materialfraktionen bzw. zwei Materialausgänge.

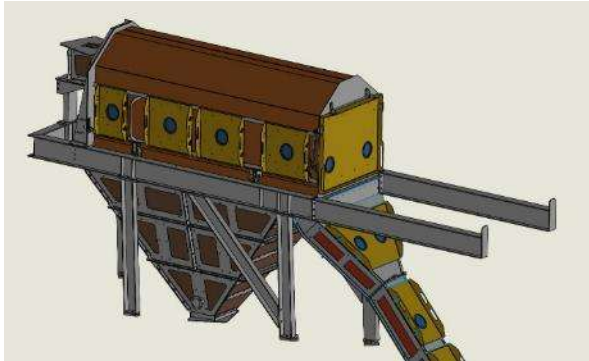


Abb. 22: Siebtrommel im Betrieb

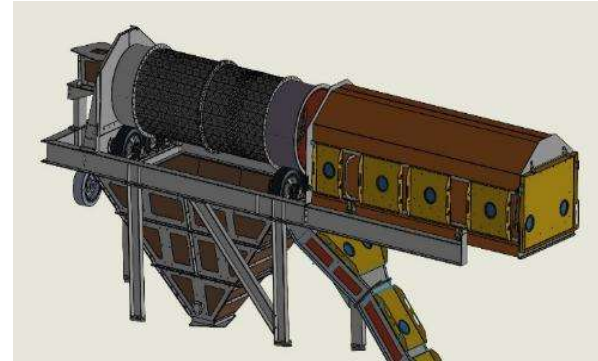


Abb. 22: Siebtrommel offen für Reinigung

Die Siebtrommel ist als ein Polygon-Skelett aufgebaut, auf dem die einzelnen Siebsegmente angeschraubt werden. Dieser Aufbau ermöglicht es für jede Anwendung die massgefertigten 3D-Siebbeläge zum Teil im «Sandwichaufbau» relativ kostengünstig fertigen zu lassen. Der Materialwahl, der Lochgeometrie, der Materialstärke und des Aufbaus sind dadurch kaum Grenzen gesetzt. Es werden Standzeiten von 4 Wochen erreicht, bis die Trommelsiebe gereinigt werden müssen. Die Reinigung erfolgt im eingebauten Zustand dauert in der Regel weniger als 2 Stunden. Wir gehen heute davon aus, dass die Trommelsiebe problemlos bis zu einer Partikelgröße von 10 mm eingesetzt werden können.

Für den Bereich der Partikelgröße kleiner 10 mm haben sich die Mehrdeck-Linearschwingsiebe bewährt.



Abb. 24: Linear-Schwingsieb für Feinfraktion

Mit den Mehrdeck-Linearschwingsieben werden in der Anlage der ZAV Recycling AG die folgenden vier Fraktionsgrößen produziert:

- < 0.3 mm
- 0.3 – 1.2 mm
- 1.2 – 4.0 mm
- 4.0 – 15 mm

Die Siebbeläge haben im 24-Stundenbetrieb eine Standzeit von ca. 3 Wochen, dann müssen diese gereinigt oder ersetzt werden.

3.6. Linienkonfiguration

Beim Bau der Aufbereitungsanlage der ZAV-Recycling AG im Jahr 2015 wurden für die Korngrößen > 15 mm das nachfolgende Aufbereitungskonzept realisiert, wobei bei der Fraktion 15 – 30 mm noch ein Glassortiergerät vor dem NE-Abscheider installiert wurde.

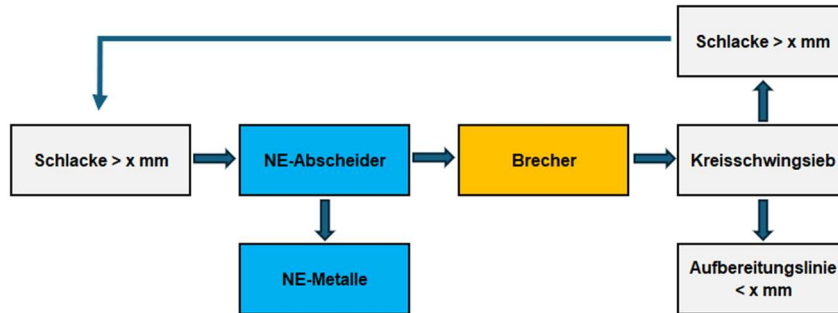


Abb. 25: Anlagekonfiguration 1. Version (2015 – 2023)

Im Betrieb hat sich gezeigt, dass diese Konfiguration die folgenden Nachteile hat:

- Das Brechen der Schlacke nach dem NE-Abscheider führt dazu, dass Schlackenanhäufungen an den separierten NE-Metallen nicht abgereinigt werden, was die Qualität bzw. die Schmelzausbeute der NE-Metalle zum Teil massiv verschlechtert.
- Es werden auch kleine NE-Metalle separiert, die mit einer wesentlich besseren Wertschöpfung in der Aufbereitungslinie < 15 mm dank Trenntischtechnik aufbereitet werden können.
- Das Blockieren des nachfolgenden Backenbrechers wird vor allem durch grössere Edelstahlmetalle (VA/SS) verursacht und nicht durch NE-Metallteile.
- Die Performance des Glasabscheiders war auch nach unzähligen Modifikationen nicht befriedigend. Einerseits kann das separierte Glas aus Qualitätsgründen (mineralische und Aluminium-Einschlüsse) nicht in die Behälterglasindustrie geliefert werden, sondern muss der Schaumglas-Herstellung (=Down-Cycling) zugeführt werden und andererseits sind die Betriebskosten (Pressluftverbrauch, Abrasion) hoch. Weiter hat das BAFU nachträglich entschieden, dass für das zurückgewonnene Glas keine vorgezogenen Entsorgungsabgaben geleistet wird und damit wurde der Betrieb der Anlage stark defizitär, d.h. hohe Kosten für einen kleinen ökologischen Nutzen.

Bei dieser Konfiguration (Abb. 25) wurde das rostfreie nicht magnetische Eisen (=Edelstahl) über die NE-Abscheider separiert.

Durch die Kapazitätserweiterung von 100'000 auf 200'000 t Schlacke mussten auch zusätzliche Aufbereitungslinien für die Schlackenkörnung grösser 15 mm installiert werden. Das ermöglichte gleichzeitig neue Aufbereitungskonzepte zu installieren. Bei den neuen Line wurden bzw. werden folgende Konzepte realisiert:

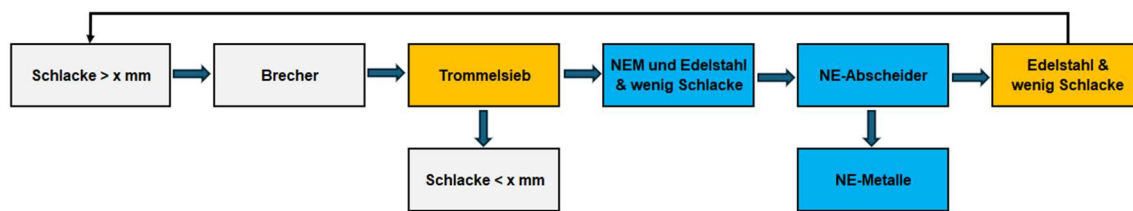


Abb. 26: Anlagekonfiguration 2. Version (ab 2022 ff) für Fraktionen >15mm

Durch den Brechprozess vor der Metallseparation konnten die Metalle von den Schlackenabackungen befreit werden und damit wurde die Qualität der separierten NE-Metalle signifikant verbessert. Weiter hatte das direkte Sieben vor der Metallabscheidung folgende Vorteile:

- Der Massenstrom von mineralischer Schlacke zum NE-Abscheider wurde stark reduziert, d.h. der nachfolgende NE-Abscheider wird nur noch mit NE-Metallen, Edelstahl und sehr wenig Schlacke beschickt. Dadurch reduzierte sich der Reinigungs- und Instandhaltungsaufwand des NE-Abscheiders signifikant.
- Der grösste ökologische und ökonomische Vorteil bestand bei dieser Optimierung darin, dass sich der Anteil der separierten NE-Metalle in der Fraktion kleiner 15 mm um ca. 30% erhöhte, weil durch das Brechen viele kleine NE-Metalle von Schlackenanhafungen befreit wurden und vor dem NE-Abscheider abgesiebt wurden. Entsprechend reduzierte sich der Anteil der NE-Metalle in der größeren Fraktion.

Diese Konfiguration wurde bei der gelben Linie (15 – 30 mm) im Jahr 2022 das erste Mal umgesetzt. Im Betrieb wurde festgestellt, dass auf Grund des Brechprozesses vor der NE-Abscheidung die Edelstahlmehalle verformt und dadurch stärker magnetisiert wurden. Dies führte dazu, dass die Edelstahlmehalle nicht mehr über den NE-Abscheider separiert werden konnten. Der Anteil Edelmetalle wurde dadurch im Kreislauf stark aufkonzentriert. Bereits nach einer kurzen Betriebszeit war der Anteil von Edelstahl im Schlackenstrom dominant, was zu Verstopfungen und damit Unterbrüchen im Betrieb führte.

Nach dem früher (2015 – 2018) bereits mit grossem Aufwand erfolglos versucht wurde Edelstahl mit Induktionsabscheider zu separieren, entschied man sich im Jahr 2023, für die Edelmehalle ein kleineres, spezifisch für die Separation von Edelstahl geeignetes Trommelsieb zu bauen. Die Anlage gemäss nachfolgendem Schema ist mit Inbetriebnahme Anfang 2024 seit 2 Jahren im Betrieb und die Performance ist beeindruckend. Erfreulich ist die Tatsache, dass der Edelstahl und vor allem die Drähte und Drahtknäuel mit höchster Effizienz separiert werden.

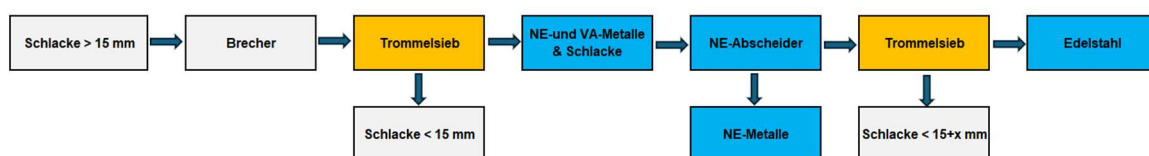


Abb. 27: Anlagekonfiguration finale Version für Fraktionen grösser 15 mm (Stand Anfang 2024)

Die aktuelle Konfiguration garantiert neben einer sehr effizienten Abtrennung der NE-Metalle eine sehr einfache, zuverlässige und wirtschaftliche Separation von Edelstahl aus der Schlacke. Die ZAV Recycling AG wird im ersten Halbjahr 2026 eine zusätzliche grüne Linie (Fraktion 30 – 80) auf Basis dieser Konfiguration in Betrieb nehmen. Man geht davon aus, dass dadurch die Gesamtperformance bezüglich Metallrückgewinnung und Produktqualität der Aufbereitungsanlage nochmals verbessert wird.

Die eingesetzten Trommelsiebe haben den zusätzlichen Vorteil, dass Drähte, die in sehr grosser Anzahl in der Schlacke vorkommen, viel effizienter abgesiebt werden können und damit die nachfolgenden Prozesse nicht belasten. Damit wird eine Störquelle für den vollautomatischen Betrieb eliminiert.

3.7. Grobschlackensortierung

Für die Aufbereitung der Grobschlacke (> 80 mm) wird in der Regel eine manuelle Sortierung eingesetzt. Für einen 24- Stunden Betrieb, bedeutet dies, dass die Handlesestation entweder 24 Stunden und 7 Tage in der Woche betrieben wird oder dass die Grobschlacke zwischengelagert und dann im Tagesbetrieb aufbereitet wird. Da eine 24-Stunden Besetzung der Handsortierstation kaum umsetzbar ist und die Zwischenlagerung bei einer Kapazitätserweiterung von 100'000 auf 200'000 t sehr aufwändig ist, wurde im Jahr 2024 im Zusammenhang mit der Kapazitätserhöhung auf 200'000 t/J entschieden eine Robotersortierung zu bauen und auf die Handsortierung vollständig zu verzichten.



Abb. 28: Handsortierung bis Mai 2025 in Betrieb



Abb. 29: Robotersortierung

Für die Umsetzung einer zuverlässigen, vollautomatisierten Grobteilsortierung im 24-Stundenbetrieb, musste eine grosse Anzahl von Anforderungen und verschiedene Sicherheitsvorkehrungen getroffen werden:

- Direkte Vorsiebung des Schlackenstroms, um zu verhindern, dass die Rechenleistung des Roboters nicht unnötig von kleineren Metall- und Schlackenteilen belastet wird.
- Abtransport des abgesiebten Materials
- Der Roboter kann Teile nur bis zu einem gewissen Gewicht und Grösse separieren.
- Der Brecher unmittelbar nach dem Roboter darf nicht mit massiven Metallteilen beschickt werden, damit dieser nicht blockiert.
- Unverbranntes Material kann brennen oder sich selbst wieder entzünden. Entsprechende Feuerdetektion und automatische Löscheinrichtung sind nötig.

- Einrichtung, um schwere Teile manuell vom Transportband zu entfernen
- Begrenzte Platzverhältnisse am Standort der Handsortierung

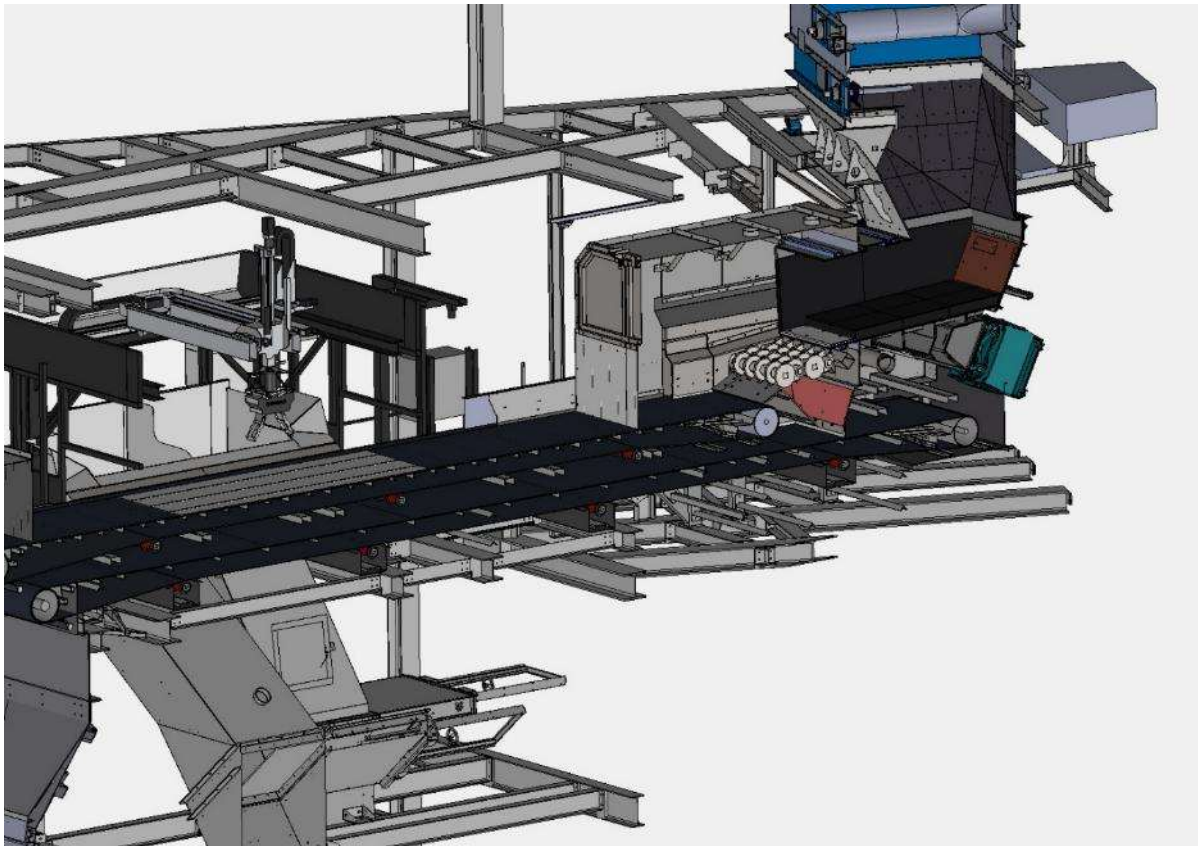


Abb. 30: Aufbau der Robotersortierung mit Scheibensieb

Die Robotersortierung wurde im Mai 2025 in Betrieb genommen und erfüllt die o.g. Anforderungen zuverlässig. Wie bereits bei der Handsortierung wurde das System der Rückführung von Teilen grösser 80 mm beibehalten, so dass verpasste Metallteile beim zweiten oder beim 3. Durchgang sicher separiert werden.

Die rein optische auf KI-basierende Materialerkennung bzw. Sortierung erfolgt anhand der Farbe und der Form (Geometrie). Dass die Farbe als zusätzliche Information für die Separation genutzt werden kann, ist dem trockenen Austrag der Schlacke zu verdanken. Weder Schlacke noch Metalle bekommen den beim Nassaustrag typischen grauen mineralischen «Schleier» und können daher sehr gut auf Basis ihrer Farbe differenziert werden. Die nachfolgenden Abbildungen zeigen diesen Unterschied zwischen dem nass und trocken ausgetragenen mineralischen Anteil und den Metallen.



Abb. 31: Nass ausgetragene Schlacke



Abb. 32: Trocken ausgetragene Schlacke

Diese Erkenntnis ist auch für die Metallaufbereitung der separierten Metallgemische von grosser Bedeutung, da auch die Metallteile keinen grauen mineralischen «Schleier» haben. Mit wenig Aufwand können verschiedene farbtypische Metalle (z.B. Zink und Blei) in einem Durchgang aufgeteilt werden, so dass diese direkt den spezifischen Schmelzwerken zu geführt werden können. Dies ist für die Kreislaufwirtschaft entscheidend, so kann zum Beispiel ein grosser Anteil des aus der Schlacke separierten Zinks verloren gehen, weil im Spezialschmelzwerk das Zink verdampft und mit dem Filterstaub ausgetragen wird. Wird der Zink nicht aus dem Filterstaub zurückgewonnen, so geht dieser dem Metallkreislauf verloren. Weiter gibt es Spezialschmelzwerke, die die schweren NE-Metalle mit hohem Zinkgehalt nicht verarbeiten können.

3.8. Materialführende Anlageteile

Die mineralische Schlacke gehört zu den Materialien, welche äusserst abrasiv sind. Gleitet die Schlacke in Kanälen oder schlägt sie auf Wände, so sind diese Anlageteile bereits nach wenigen Wochen auszuwechseln.

Vibrorohre



Abb. 33: geschlossenes Vibrorohr

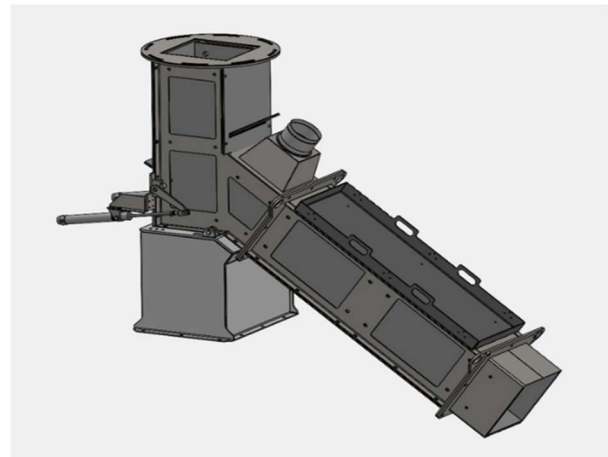
Für den Transport von Schlacke kleiner 30 mm haben sich Vibrorohre bei der ZAV Recycling AG seit 2020 bestens bewährt. Vibrorohre sind sehr flexibel einsetzbar, sind luftdicht bzw. staubdicht und haben mit dem richtigen wechselbaren Verschleisschutz Standzeiten von mehreren Jahren. Die Vibrorohre werden für die folgenden Anwendungen eingesetzt:

- Materialtransport von A nach B
- Aufteilung von Materialströme
- Dosierung
- Flexible Verteilung von Material
- Siebung von wenig komplexen Materialströmen

Vibrorohre sind leise im Betrieb aber es werden Vibrationen auf den Stahlbau übertragen. Da die Rohre im Betrieb im Gegensatz zu anderen Fördersystemen keine Probleme verursachen, lohnt sich der Aufwand, die Vibrationen abzufangen. Müssen grössere Gefälle überwunden werden, wird vor dem Vibrorohr mit Materialtaschen gearbeitet. Vibrorohre werden auch für den Transport von Metallen eingesetzt. Bei Distanzen grösser 8m müssen mehreren Rohren in Serie geschaltet.

Schlackenkanäle

Schlackenkanäle werden dort eingesetzt wo die Schwerkraft der Schlacke für deren Transport ausreicht. Schlackenkanäle werden nicht als geschlossenen Kanäle, sondern in Skelettforn aufgebaut. Die materialführenden Verschleissplatten werden über Deckel gut zugänglich von innen und aussen ans Skelett geschraubt. Neben der guten Sichtbarkeit von Leckagen und dem einfachen Wechseln von Verschleissplatten trägt dieses System auch zu Gewichtseinsparungen bei.



3.9. Andere Themen

Exzentrisch vs. zentrisch NE-Abscheider

Die exzentrische Bauweise der NE-Abscheider wurden in den frühen Jahren der NE-Abscheidung gebaut, um die Induktionstrommel des NE-Abscheiders vor magnetischen Metallen zu schützen, die von der Induktionstrommel angezogen und vom Induktionsfeld stark erhitzt wurden. Der Energieeintrag der magnetischen Metalle zerstörte jeweils das Gummiband und zum Teil die Induktionstrommel, wenn das Metallteil nicht rechtzeitig entfernt werden konnte. Mit einer effizienten Eisenabscheidung und einer zusätzlichen Umlenkrolle nach der Induktionstrommel des NE-Abscheiders ist die Wahrscheinlichkeit eines Defekts sehr klein. Damit reduziert sich der Vergleich auf die Position der Magnettrommel und der technischen Ausführung. Der exzentrische NE-Abscheider ist in der technischen Ausführung komplexer und die Wirkung des Induktionsfeld wirkt wesentlich kürzer auf das einzelne Metallteil. Da in der Anlage der ZAV Recycling AG auf Grund des Kreislaufprozess sämtliche Metalle grösser 15 mm abgetrennt werden, kann keine Aussage zu den Linien mit den Fraktionen grösser 15 mm gemacht werden. Bei den Fraktionen kleiner 15 mm gehen wir davon aus, dass neben einer maximalen Induktionskraft auch die Zeit, in der die Induktionskraft aktiv wirkt, entscheidend ist. Daher sind NE-Abscheider für diese Fraktionen mit einer zentrischen Magnettrommel vorteilhaft ist.

Metalle aus der thermischen Abfallverwertung

Die Metalle aus der Schlackenaufbereitung haben den grossen Vorteil, dass durch den thermischen Prozess alle organischen Verbindungen verbrannt und in Energie umgesetzt wurden. Die Metalle aus den Separatsammlungen werden mechanisch aufbereitet und dann mit einem gewissen Anteil an organischem Material ins Schmelzwerk geliefert. Im Schmelzwerk verbrennt das organische Material und belastet die Rauchgase des Schmelzwerkes, was zu Emissionsgrenzwert-Überschreitungen führen kann. Die europäischen Schmelzwerke agieren daher sehr zurückhaltend auf bestimmte Schrottware bzw. lehnen diese ab. So erfreut sich zum Beispiel das Aluminium 1 -15 mm der ZAV Recycling AG einer grossen Nachfrage, da dieses emissionsfrei eingeschmolzen werden kann. Man kann davon ausgehen, dass in Zukunft die Emissionsgrenzwerte in den Schmelzwerken weiter reduziert werden, so dass es immer schwieriger wird, Metalle mit organischer Verschmutzung in den Metallkreislauf zurückzuführen. Dies ist eine zusätzliche Einschränkung zur Tatsache, dass das Aluminium aus dem Recycling und auch der Schlacke eine breite Zusammensetzung von Legierungen haben, welche deren Einsatz einschränkt.

Prozessbeherrschung

Um eine maximale Prozessbeherrschung und damit eine konstante mineralische und metallische Produktqualität zu erzielen, wurden in der KEZO, der ZAV Recycling Ag und der Stiftung ZAR kontinuierlich an den folgenden Einflussgrössen gearbeitet:

- Qualität der Trockenschlacke insbesondere an einem tiefen TOC
- Konstanter und optimaler Durchsatz bei den NE-Abscheidern
- Aufteilung der Schlackenfraktionen auf 6 Aufbereitungslinien

- 24h/7Tage-Betrieb erfordert hoher Automatisierungsgrad
- Hohe Metalausbeute bzw. tiefer Restmetallgehalt in der Schlacke
- Metallqualität, die direkt ins Schmelzwerk geliefert werden kann
- 4 Rest-Schlackenfraktionen, welche separat analysiert und optimiert werden können

4. Zukünftig anzustrebende Optimierungen

4.1. Anlage spezifisch

Fraktionsanpassungen in Richtung 20 mm

Die Aufteilung der NE-Metalle in den Trenntischen erfolgt heute bis zu einer Korngrösse von 15 mm. Aufgrund der Tatsache, dass durch die thermische Abfallverwertung viele der NE-Metalle in kugelförmiger Form vorliegen, wäre eine Erhöhung des Sortierbereichs der orangenen Linie von heute 0.3 – 15mm auf 0.3 – 20 mm aus ökologischen und wirtschaftlichen Überlegungen sinnvoll. Bei der bestehenden Anlage der ZAV Recycling AG müsste in die Vorsiebung, die Siebung der NE-Metalle, den Transport der Metalle zum und vom neuen zusätzlichen Trenntisch investiert werden. Bei den NE-Abscheidern würde man die Fraktionsbereich von 5 – 15 mm auf 5 – 20 mm erhöhen, was zu keiner Verschlechterung der Effizienz der NE-Abscheidung führen sollte. Es wäre auch denkbar bei der bestehenden Anlage durch Anpassung der Vorsiebung eine schrittweise Anpassung der Fraktionsgrösse zu machen.

Vorteile der Fraktionsanpassung sind:

- Grössere Menge Aluminium, die direkt ins Schmelzwerk geliefert werden kann.
- Die Schmelzausbeute des Aluminiums würde sich leicht erhöhen, da der Anteil gröberes Aluminium grösser wird.
- Es würde eine zusätzliche NE-Edelmengende produziert werden mit wahrscheinlich tieferem Edelmetallgehalt (Goldgehalt prüfen)
- Entlastung der gelben Linie (15 – 30 mm auf 20 – 30 mm)
- Reduktion der Brechleistung, da nur noch bis 20 mm gebrochen werden muss

Neben diesen Vorteilen sind folgende Eigenschaften zu prüfen:

- Einfluss auf die mineralische Fraktion (Deponie, Zementwerk)
- Zusätzliche Verdünnungen bei den Edelmetallen, was zu einer Ertragsminderung führen könnte
- Qualitative Verschlechterung der Metalle wegen mineralischen Anbackungen (weniger Brechleistung)

Siebung der Schlacke

Die ZAV Recycling AG hat in der Triage (Grobschlackenaufbereitung) zwei redundante Sieblinien, wobei die Beschickung über ein reversierbares Transportband erfolgt. Dadurch können die beiden Sieblinien nicht gleichzeitig beschickt werden. Es wäre jedoch bei hohem Durchsatz von grossem Vorteil, wenn beide Siebe gleichzeitig im Betrieb sein könnten und der Einlinienbetrieb nur bei Revisionen nötig wäre. Auch hat der Betrieb der letzten 10 Jahre gezeigt, dass der Betrieb eines reversiblen Transportbandes aufwändig ist. Der Ersatz des reversiblen Transportbandes durch eine Schurre mit Klappe, geteiltem Vibratorrohr, etc. hätte folgende Vorteile:

- Kleinere Siebelastung und dadurch bessere Siebqualität bei hohem Durchsatz
- Weniger Instandhaltungsaufwand (reversibles Transportband, tiefere Siebelastung)

Mit der Inbetriebnahme der zweiten grünen Linie mit dem Trommelsieb nach dem Brecher ist jedoch verfahrenstechnisch auf Grund dieser Modifikation mit keiner signifikanten Verbesserung zu rechnen. Diese Modifikation könnte höchstens dazu führen, dass die Kapazität in der Grobschlackenaufbereitung erhöht werden könnte, wobei dies unter Anderem auch mit grossen Investitionen in der Fördertechnik verbunden wäre (Durchsatzleistung Becherwerke, Schurren, Förderbänder)

Magnetische Schlacke

Von der Zementindustrie wurde gefordert, dass das Verhältnis von Eisen zu NE-Metallen verbessert wird. Der Forderung ist man mit folgenden Massnahmen entgegengekommen:

- Reduktion der Magnetstärke der Trommelmagnete vor den NE-Abscheidern der Fraktion kleiner 15 mm
- Verzicht auf den Magnetabscheider in der Zuführung vor dem Silo
- Optimierung der NE-Abscheidung

Sollten die kleinen Edelstahldrähte in der magnetischen Schlacke ein Störfaktor für die Zementindustrie sein, könnte der Magnetabscheider wieder eingebaut werden und auch die die Magnetstärke bei den Trommelmagneten > 5 mm weiter abgeschwächt werden.

Es ist jedoch darauf zu achten, dass wenn eine Schlackenfraktion verbessert wird und die Schadstoffe nicht eliminiert werden können, dass dadurch die weiteren Fraktionen verschlechtert werden.

Aufbereitung der FE-Fraktion kleiner 80 mm

Das Eisen aus den Linien der Fraktion kleiner 80 mm ist zurzeit schwer zu vermarkten auf Grund der mineralischen Anbackungen. Damit der Absatz dieser Eisenfraktion langfristig gesichert und nicht nur Kosten, sondern auch einen Ertrag generiert, muss die Eisenqualität verbessert werden. Damit diese Fraktion abgesetzt werden kann, müssen die Schlackenanhafungen signifikant reduziert werden. Damit drängt sich eine weitere Brecherstufe auf. Auf Grund der resultierenden Eisenqualität kann dann entschieden werden, ob sich der Einsatz eines zusätzlichen Überbandmagneten und/oder ein zusätzliches Trommelsieb eingesetzt werden muss, oder ob die gebrochene Eisenfraktion wieder in den vorhandenen Prozess zurückgeführt werden kann.

4.2. Material spezifisch

Abtrennung von unverbranntem Material

Die Aufbereitungsanlage der ZAV Recycling AG kann unverbranntes Material grösser 80 mm bei der Handsortierung aus der Schlacke separieren. Unverbranntes in den Fraktionen kleiner 80 mm wird nicht separiert. Für die Fraktionen 15 – 30mm und 30 – 80mm wird ein grosser Teil des Unverbrannten zusammen mit der Edelstahlfraktion über das Trommelsieb abgetrennt. Obwohl der prozentuale Anteil des Unverbrannten in der Schlacke sehr klein ist, wird dieser in dem auch kleinen Anteil von Edelstahl in der Schlacke angereichert. Der grosse Un-

terschied der Schüttdichten zwischen dem Unverbrannten und dem Edelstahl lässt die Edelstahlfraktion trotz kleinem Anteil an Unverbrannten optisch nicht sehr attraktiv aussehen. Das Unverbrannte bzw. der organische Anteil im Edelstahl wird zu Emissionen beim Schmelzer führen und erschwert den Absatz dieser Fraktion. Auch gilt es zu berücksichtigen, dass das Unverbrannte in den Brecherstufen teilweise zerkleinert wird und sich in den Aufbereitungslinien kleiner 15 mm aufkonzentriert und zu Ablaufstörungen führen kann.

Obwohl die Separation von Unverbrannten kurzfristig ökonomisch nicht relevant sein wird, sollte an der Strategie der ZAV Recycling AG festgehalten werden, qualitativ hochstehende Produkte zu produzieren.



Abb. 35: Edelstahl mit Unverbranntem

Reduktion des Zink-Gehalt in der schweren NE-Fraktion

Die schwere NE-Metallfraktion der ZAV Recycling AG wird direkt in die Spezialschmelzwerke der Aurubis und Umicore abgegeben. Die Vergütung für die Metalle beschränkt sich auf einen Anteil von ca. 70 Massen-% der Metalle. Für Metalle wie Zink, Zinn etc. gibt es keine Vergütung. Weiter muss davon ausgegangen werden, dass der Hauptteil der nicht vergüteten Metalle insbesondere Zink beim Aufbereitungsprozess verloren geht, oder nur teilweise in den Metallkreislauf zurückgeführt wird. Gelingt es, diese Metalle effizient aus der schweren NE-Metallfraktion zu separieren, so hat dies folgende Vorteile:

- Das separierte Metall Zink kann als Wertstoff über eine Zinkhütte wieder in den Metallkreislauf gebracht werden und wird vergütet.
- Durch die Reduktion der Masse der schweren NE-Metalle um ca. 20% erhöht sich entsprechend der Gold-, Silber- und Palladiumanteil in dieser Fraktion. Zusätzlich zu einer besseren Vergütung der Edelmetalle durch weniger relativen Abzügen werden sich die Schmelz- und Probenahmekosten entsprechen reduzieren.

Bei einem aktuellen Anteil von 0.4 % schweren NE-Metallen grösser 5 mm bezogen auf die Menge aufbereitete Schlacke, könnten rund 120 t Zink in den Metallkreislauf zurückgeführt werden.

Auf Grund einer guten optischen Differenzierung liessen sich die Fraktionen Zink-, Zinn- und Blei zusammen, relativ einfach optisch mit künstlicher Intelligenz abtrennen. Entscheidend ist, dass keine Edelmetalle mit dem Zink separiert werden, d.h. das Ziel darf es nicht sein alles Zink zu separieren, sondern sicherzustellen, dass keine Edelmetalle mit dem Zink abgetrennt werden.

Die Separation sollte, wenn immer nur möglich auf Einzelkorn-Abtrennung basieren.

Abtrennung von Aluminium aus den gröberen NE-Fractionen

In den NE-Metallen aller Fraktionen aus der Schlacke ist Aluminium mengenmässig mit Abstand am häufigsten vertreten (ca. 60%). Das Aluminium ist nicht das wertvollste Metall der NE-Metalle, hat aber bezüglich der CO₂-Einsparung mit Abstand das grösste Potential. Da die CO₂-Bilanzen immer mehr an Bedeutung gewinnen, wäre die direkte Separation von Aluminium aus den gröberen NE-Gemischen ökologisch und auch ökonomisch von Vorteil. Analog zur Aluminiumreinigung der Fraktion 1 – 15 mm, könnte mit einem NE-Abscheider das Aluminium aus der NE-Fraktion 15 – 30 mm separiert werden.

Farbe als neues Separationsmerkmal

Die Tatsache, dass die einzelnen Materialien (Metall & Mineralik) beim Trockenaustrag ihre Farben beibehalten, ermöglicht es die Materialien auf Basis ihrer Farbe und Form zu separieren. Wir gehen davon aus, dass mit künstlicher Intelligenz und Bilderkennung der Separationsprozess in Zukunft wesentlich günstiger und effizienter realisiert werden können.

5. Aktuelles Aufbereitungsverfahren der ZAV Recycling AG (2025)

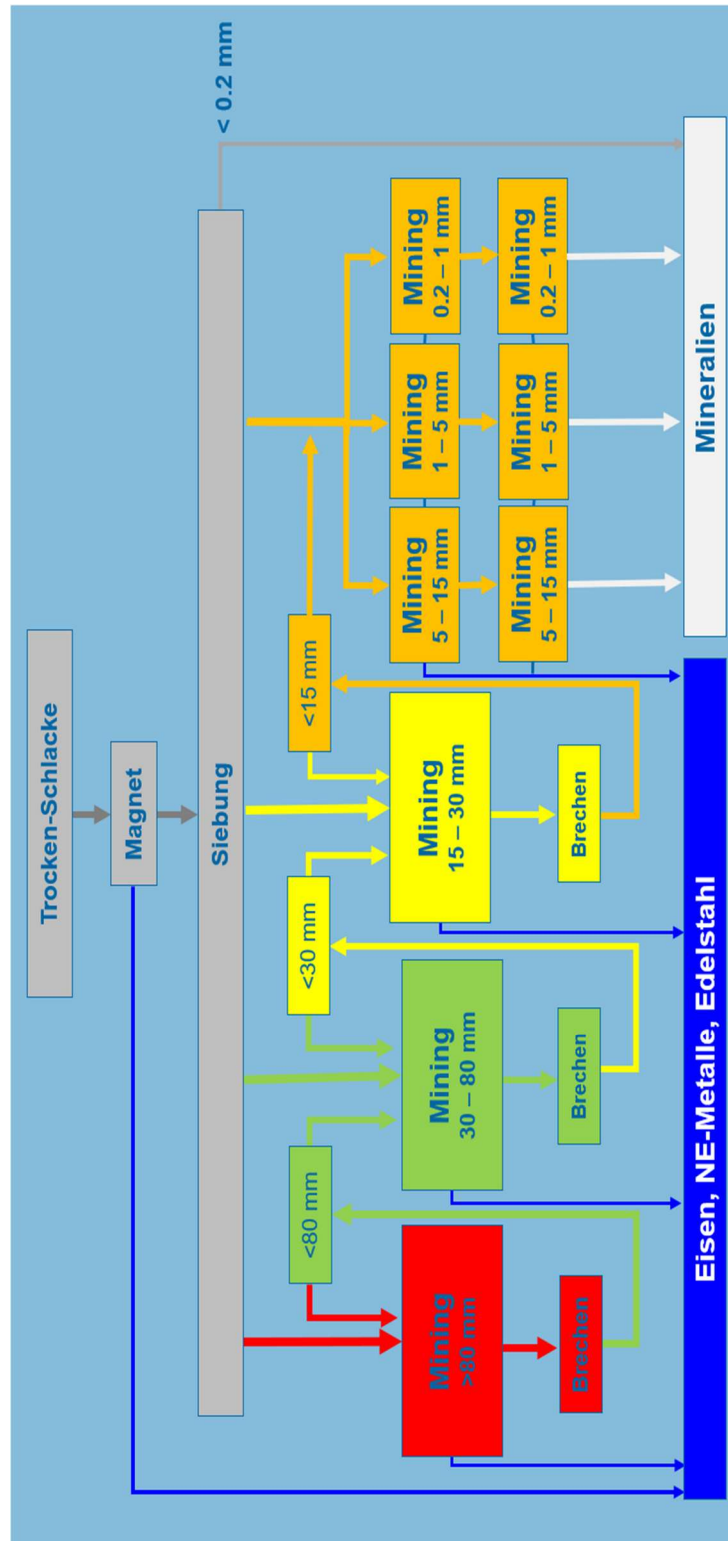


Abb. 33: Das Verfahrensschema der ZAV Recycling AG (Stand 2025)

Gegenüber der letzten Berichterstattung 2020 (Schriftenreihe Nr. 2) wurden folgende Anpassungen am Prozess vorgenommen:

	2025	Begründung
Fraktion > 80 mm	Reduktion Anzahl Scheibensiebwellen	weniger Betriebsunterbrechungen
	Ersatz Handsortierung durch Robotersortierung	Kapazitätssteigerung Automatisierung
	neuer Backenbrecher mit automatischer Entstopfungseinheit	Automatisierung
Fraktion 30 – 80 mm	Zusätzliche neue Linie wird 2026 in Betrieb genommen	Kapazitätssteigerung Optimierung Metallqualität Separation VA Höhere Wertschöpfung Automatisierung
Fraktion 15 – 30 mm	Fraktionsgrenze von 12 mm auf 15 mm angepasst	Höhere Wertschöpfung
	Zusätzliche Linie mit neuem Aufbereitungskonzept	Kapazitätssteigerung Optimierung Metallqualität Höhere Wertschöpfung
	VA-Sortierung mit Trommelsieb	Bessere Performance der Gesamtanlage
Fraktion 0.2 – 15 mm	Fraktionsgrenze von 12 mm auf 15 mm angepasst	Höhere Wertschöpfung
	Eine zusätzliche Linie bzw. eine weitere Fraktion	Kapazitätssteigerung Optimierung Metallqualität Höhere Wertschöpfung

6. Die Mineralik in der Schlacke

Nach der Separation der Metalle aus der Schlacke verbleibt ein mineralischer Anteil von 85 %. Dieser verteilt sich in den folgenden Prozentzahlen auf die verschiedenen Fraktionen:

- Schlackenstaub (kleiner 0.3 mm): 10 %
- Aufbereitete Schlacke (0.3 – 1.2 mm): 15 %
- Aufbereitete Schlacke (1.2 – 15 mm): 50 %
- Magnetische Schlacke (0.3 – 15 mm): 25 %

Die magnetische Schlacke erfüllt die Anforderung der VVEA (Verordnung über die Vermeidung und die Entsorgung von Abfällen; Abfallverordnung, VVEA Schweiz) bezüglich einem Rohmehlkorrekturstoff für die Zementindustrie:

<i>Anhang 4⁵⁹</i> (Art. 19 Abs. 3 und 24)	
Anforderungen an Abfälle für die Herstellung von Zement und Beton	
1.3	Abfälle, die überwiegend aus Calcium, Aluminium, Eisen oder Silizium bestehen, dürfen als Rohmehlkorrekturstoffe verwendet werden, wenn sie: <ol style="list-style-type: none"> a. höchstens 10 mg Cadmium pro kg enthalten; b. die Grenzwerte nach Ziffer 1.1 für Quecksilber, Thallium und für die organischen Stoffe nicht überschreiten; und c. höchstens einen Anteil von 5 Gewichtsprozent an der Gesamtmenge von Rohmaterial und Rohmehlkorrekturstoffen ausmachen.

Auf Wunsch eines Zementherstellers wurden an der magnetischen Fraktion noch die folgenden Optimierungen vorgenommen:

- Erhöhung Fe_2O_3
- Reduktion des Verhältnis Al/FE

Wir gehen davon, dass im ersten Halbjahr 2026 grössere Mengen der magnetischen Schlacke bei einem Zementhersteller als Rohmehlkorrekturstoff eingesetzt werden kann, um Langzeiterfahrungen gewinnen zu können. Ziel der Versuche ist es, einen Qualitätsstandard für den Einsatz von magnetischer Schlacke als Rohmehlkorrekturstoff zu definieren, auf dessen Basis die Zementindustrie mit magnetischer Schlacke als Ersatzrohstoff versorgt werden kann.

Weiter wurde im März 2024 das USG wie folgt ergänzt:

<i>Art. 48a</i>	Pilotprojekte Der Bundesrat kann für die Durchführung von innovativen Pilotprojekten Bestimmungen erlassen, die von diesem Gesetz abweichen, sofern diese Bestimmungen in zeitlicher, örtlicher und sachlicher Hinsicht begrenzt sind und dazu dienen, Erfahrungen für die Weiterentwicklung dieses Gesetzes und dessen Vollzug zu sammeln.
-----------------	---

Mit dieser Änderung im USG wäre es heute auch möglich grössere Mengen von aufbereiteter Schlacke versuchsweise in der Zementindustrie einzusetzen. Diese Versuche müssten vom BAFU und dem entsprechenden Kanton bewilligt werden. Die Versuchsergebnisse würden dann im Sinne einer gesamtheitlichen Bewertung unter Einbezug von Themen wie Ressourcengewinnung, CO₂, Energie, Deponieraum und Schutz von Mensch und Umwelt für die Kreislaufwirtschaft beurteilt werden. Dieses Vorgehen ermöglicht es den Einsatz von aufbereiteter Schlacke in der Zementindustrie in einem ganzheitlichen Zusammenhang zu beurteilen und nicht auf eine rein analytische Bestimmung der Metalle bzw. deren Grenzwerte zu reduzieren.

Die Stiftung ZAR verfolgt die Strategie den mineralischen Anteil der Schlacke so aufzubereiten, dass diese die Anforderungen der Zementindustrie als alternative Rohstoffe erfüllen. Auf Grund der strikten Qualitätsvorgaben und auch Kontrollen der Zementqualität wird sichergestellt, dass der mineralische Anteil der Schlacke der Zementindustrie einen Nutzen generiert und keine potenziellen Altlasten produziert.

7. Metallerträge

Die Metallerträge waren in den letzten Jahren durch die stark steigenden Edelmetallpreise dominiert. Im Gegensatz dazu hat das mengenmässig dominante Eisen stark an Wert verloren, so dass die Erträge aus der Veräusserung von Eisen nicht einmal mehr die Produktionskosten decken. Die nachfolgende Grafik zeigt die Entwicklung der durchschnittlichen Metallerträge seit 2020. Neben der steigenden Metallpreise haben auch die Anlageoptimierung zu dieser Steigerung der Erträge beigetragen.

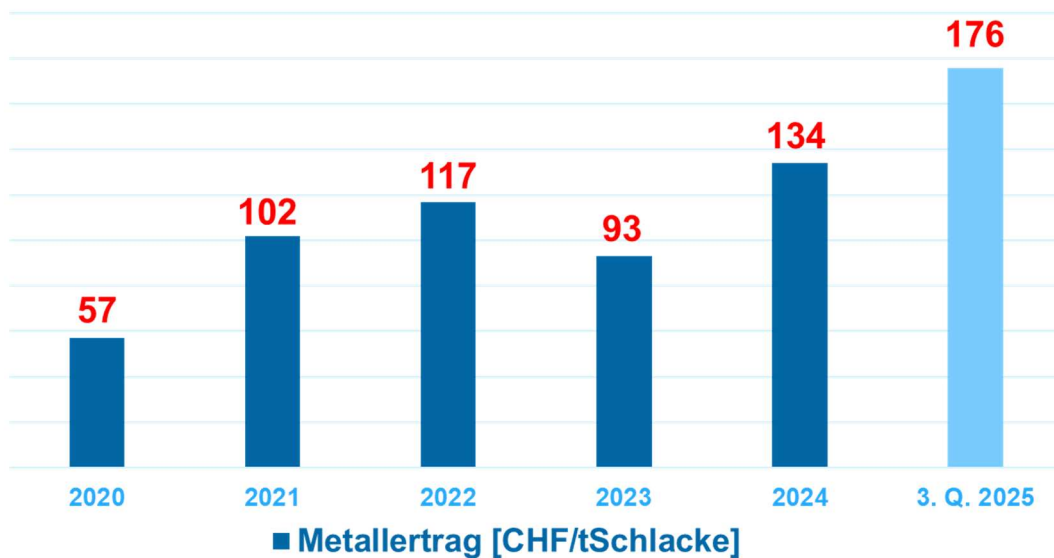


Abb. 34: Metallerträge der ZAV Recycling AG pro Tonne aufbereitete Schlacke

Die Erträge sind in der nachfolgenden Tabelle auf die einzelnen Fraktionen aufgeteilt

Tab. 4: prozentualer Anteil der einzelnen Metallfraktionen und deren Anteile am Metallgesamtertrag
Im Jahr 2025

	Anteil an den Metallen [%]	Anteil am Ertrag [%]
NE-schwer	4	60
Aluminium kleiner 15 mm	15	17
NE-Metalle grösser 15 mm	14	20
Edelstahl	2	1
Eisen	65	2

Auffallend ist, dass fast 80% der Metallerträge aus der Veräusserung der Metalle aus der Schlackenfraktion kleiner 15 mm erwirtschaftet wird, obwohl die Metalle grösser 15 mm auch von guter Qualität sind. Verantwortlich für dieses Resultat ist die Trockenschlacke, die einerseits einem vollautomatisierten und effizienten Aufbereitungsprozess zulässt und andererseits die Metalle nicht verschmutzt.

8. Historie

2006–2010

Entwicklung des Trockenaustrags von Schlacke und Bau der ersten Schlackenaufbereitungsanlage für Trockenschlacke für eine Fraktion kleiner 5 mm in der KEZO, Hinwil mit der Unterstützung von BAFU, AWEL, UMTEC und weiteren Anlagelieferanten.

2010

Gründung der Stiftung Zentrum für nachhaltige Ressourcen- und Abfallnutzung mit diesen Zielen und Visionen:

Maximierung der Materialrückgewinnungsrate für metallische und mineralische Rohstoffe

Nachsorgefreie Lagerung verbleibender Rückstände in separaten Deponie-Kompartimenten (Zwischenlager)

Beitrag zur Emissionsminimierung und Klimanutzen über den Kreislaufansatz

Die Entwicklungskosten werden durch eine Vielzahl von Donatoren (KVA, Anlagelieferanten, Deponiebetreibern, Stiftungen, etc.) getragen.

2014–2016

Die ZAV Recycling AG baut in Hinwil, in direkter Nachbarschaft zur KEZO, die erste Grossanlage zur Aufbereitung von trocken ausgetragener Schlacke mit einer Verarbeitungskapazität von 100'000 Tonnen pro Jahr, erweiterbar auf eine Verarbeitungskapazität von 200'000 Tonnen pro Jahr. Mit der Anwendung des sequenziellen Brechens der Schlacke können nun auch kleinste Metallteile aus den Schlackenagglomeraten freigelegt und den Metallabscheidern zugeführt werden.

2017

Nach der aufwendigen Inbetriebnahme der Anlage kann im Jahr 2017 eine erste Metallbilanz über ein gesamtes Produktionsjahr erhoben werden. Obwohl die Anlage noch nicht gänzlich optimiert ist, wurde die Erwartung der NE-Metallausbeute im Fraktionsbereich kleiner 12 mm deutlich übertroffen. Damit wurde nachgewiesen, dass der Beitrag, der in den Schlackenagglomeraten eingeschlossen NE-Metalle wesentlich grösser ist, als dies erwartet worden ist.

2017–2018

Um die Performance der Aufbereitungsanlage zu überprüfen, wurde von Mai bis Juli 2017 eine statistisch gesicherte Probenahme über sämtliche Massenströme der Aufbereitungsanlage der ZAV Recycling AG durchgeführt. Die Probeaufbereitung erweisen sich als sehr aufwändig, so dass die Auswertungen erst im Sommer 2018 zur Verfügung stehen.

2019 ff

Die Anlage wird weiter optimiert.

2021

Feinschlackenaufbereitung wird von zwei auf drei Fraktion erweitert.

2022

Bei der Fraktion 15 – 30 mm wird eine zusätzliche Linie nach neuem Aufbereitungskonzept in Betrieb genommen.

2023

Die Eisenaufbereitung wird neu aufgebaut.

2024

Die Rückführung der aufbereiteten Schlacke in den Containerbahnhof und die Anlage zur Nachreinigung der Aluminium-Fraktion 1 – 15 mm wird in Betrieb genommen.

2025

Die Robotersortierung für Grobschlacke wird in Betrieb genommen.