

Statusbericht vom 31. Juli 2017

Leistungsfähigkeit und Potentiale der Schlacke- Aufbereitungsanlage der ZAV Recycling AG

Auftraggeber

ZAR Stiftung Zentrum für nachhaltige Abfall- und Ressourcennutzung

Autor

Daniel Böni

Inhaltsverzeichnis Seite

1	Zusammenfassung	3
2	Ausgangslage	5
2.1	Organisation	5
2.2	Verfahren	5
3	Beurteilung der Leistungsfähigkeit	7
3.1	Methodik	7
3.2	Übersicht der separierten Wertstoffe	8
3.3	Ausbeute FE-Metalle	9
3.3.1	Weitere Potentiale der FE-Gewinnung	10
3.4	Ausbeute NE-Metalle	10
3.4.1	Weitere Potentiale in der NE-Metallgewinnung	12
3.5	Angelieferte Schlackenmenge	13
3.5.1	Zusammensetzung/Qualität der Schlacken	14
3.6	Leistungsfähigkeit im Vergleich	15
3.7	Restmetallgehalt in der aufbereiteten Schlacke.....	15

4	Betrieb der Aufbereitungsanlage	16
4.1	Betriebsmodus «24-7-52».....	16
4.2	Abrasion.....	17
4.3	Schlackenfraktionierung/Siebung	18
4.3.1	Linearsieb	18
4.3.2	Scheibensieb	18
4.3.3	Nasensieb.....	19
4.4	VA-Abscheider.....	20
4.5	Glasabscheider	20
4.6	Containerkran	20
4.7	FE-Aufbereitung.....	20
4.8	Energieverbrauch	21
5	Mineralische Fraktion	21
6	Integrationsprojekt	22
7	Lärmemissionen	22
8	CO₂-Bilanz auf Basis der Metalle.....	22

1 Zusammenfassung

Nach einer längeren Bau- und Inbetriebnahmephase der weltweit ersten Aufbereitungsanlage für Trockenschlacke standen Ende Oktober 2016 sämtliche Aufbereitungslinien für die Separation von Metallen aus der Schlacke dem Betrieb zur Verfügung. Obwohl sich der Fokus der Aktivitäten auf die betrieblichen Abläufe konzentrierte und man bis heute wenig Zeit für die Optimierungen der Anlage fand, sind die Performancezahlen der Anlage erfreulich. Nach rund einem halben Jahr Dauerbetrieb kann eine erste Zwischenbilanz erstellt werden. Es stimmt zuversichtlich, dass bereits heute ein grosser Teil der betrieblichen Zielsetzungen erreicht werden konnten:

- Kapazität: Die angestrebte Durchsatzleistung von 2'000 t Trockenschlacke pro Woche für die erste Phase konnte anlagentechnisch verarbeitet werden. Die Schlackenlieferungen der Anlagen Satom, Monthey; KEBAG, Solothurn; KVA Horgen, KVA Hagenholz und KEZO führen zur Volllauslastung der installierten Verarbeitungskapazität.
- Ausbeute der NE-Metalle: mit einem Anteil von 4.5% separierten NE-Metallen aus der angelieferten Rohschlacke wurde die bereits ambitionöse Zielsetzung von 3.5% um fast 30% übertroffen.
- Schwere NE-Metallfraktion: Die schwere NE-Metallfraktion grösser 5 mm hat wesentlich höhere Edelmetallgehalte (Gold, Silber, Palladium) als erwartet. Damit lag auch der Anteil der schwereren und damit wertvolleren NE-Metalle mit 0.5% bezogen auf die angelieferte Rohschlacke um rund 30% über den Erwartungen. Wir gehen heute davon aus, dass das Konzept des selektiven Brechens der Schlacke einen grossen Anteil der kleinen NE-Metalle in den Schlackenagglomeraten zur Nutzung freilegt.
- Ausbeute der NE-Metalle: Basierend auf Erfahrungswerten von Aufbereitungsanlagen für Nassschlacke kann heute bereits gesagt werden, dass die Ausbeute der NE-Metalle aus der Trockenschlacke mit über 50% quantitativ signifikant höher ist.
- Energieverbrauch: Der Stromverbrauch der Aufbereitungsanlage ist rund 60% tiefer als erwartet und beträgt im Mittel ca. 16 kWh pro Tonne Schlacke.

Trotz der erfreulichen Zwischenbilanz verbleiben folgende Herausforderungen:

- VA-Abscheider: Der Abscheidungsgrad des rostfreien Stahls (VA) ist ungenügend und führt zu Ablaufproblemen, ungenügender VA-Qualität und Verlusten bei den NE-Metallen. Mit neuen Sensoren und besseren Ausblasventilen soll der Abscheidungsgrad des VA-Abscheiders wesentlich verbessert werden.
- Glas-Qualität: Der Anteil an Fremdstoffen in den separierten Glasscherben ist noch zu hoch, um diese direkt in die Glashütte zurück führen zu können.

Durch diverse Verbesserungen des Materialflusses durch den Glasabscheider soll die Scherbenqualität verbessert werden.

- Abrasion: Der Metallabtrag in den Kanälen und Übergängen durch die abrasive Schlacke verursacht noch zu viel Unterhaltsarbeiten und Kosten. Mit Spezialmaterialien und massgeschneiderten Materialführungen sollen die Unterhaltskosten reduziert werden.

Zurzeit befindet sich eine detaillierte Stoffbilanzierung mit Ermittlung der Restmetallgehalte in den Schlacken und den Produktqualitäten einer 10-wöchigen Messperiode in der Auswertung. Anhand dieser ausführlichen Analyse werden im November auch erstmals wichtige repräsentative Grundlagen für die qualitative Bewertung der Anlageperformance zur Verfügung stehen. Mit diesen Daten kann eine Priorisierung der Anlagenoptimierung vorgenommen werden. Neben der Verbesserung der Glasqualität, des Abscheidegrads von VA-Metallen, wird die vor allem die Erhöhung der Ausbeute der NE-Metalle angestrebt. Einige Massnahmen sind bereits in der Umsetzung.

2 Ausgangslage

2.1 Organisation

Vier Trägerschaften haben im Rahmen einer langfristigen Zusammenarbeit im 2013 die ZAV Recycling AG mit Sitz in Hinwil gegründet: die Interkommunale Anstalt Limeco, Dietikon, der Zweckverband Kehrrechtverwertung Zürcher Oberland KEZO, Hinwil, der Zweckverband Kehrrechtverwertung im Bezirk Horgen, Horgen und die Stadt Zürich, Entsorgung & Recycling, Zürich

Mit dem Bau der weltweit ersten Aufbereitungsanlage für Trockenschlacke legt die ZAV Recycling AG den Grundstein für die Umsetzung des **thermo-re®-Prozesses** und damit einen wichtigen Beitrag für eine nachhaltige Abfallwirtschaft der Zukunft. Die Schlackenaufbereitungsanlage der ZAV Recycling AG wurde auf dem Betriebsgelände der KEZO sowie in deren Betriebsgebäuden installiert. Die Anlage ist vollständig in die Betriebsprozesse der KEZO integriert und wird durch die Mitarbeiter der KEZO betrieben.

Das ZAR-Team hat im Sinne der Umsetzung des **thermo-re®-Prozesses** federführend bei der Inbetriebnahme und der Optimierung der Anlage mitgewirkt.

Ab November 2015 wurde im Rahmen eines Testbetriebs erstmals Trockenschlacke der KEZO verarbeitet. Der eigentliche Betrieb begann am 1. Februar 2016 mit der erstmaligen Entgegennahme von externer Trockenschlacke aus der KVA Horgen. Bereits Ende Oktober 2016 wurde die angestrebte Verarbeitungskapazität von rund 100'000 t Schlacke pro Jahr erreicht. Ab November 2016 waren sämtliche fünf Separationslinien für die Verarbeitung sämtlicher Schlackenfraktionen in Betrieb.

2.2 Verfahren

Die Aufbereitungsanlage der ZAV Recycling AG wurde in der ersten Ausbaustufe auf eine Jahreskapazität von 100'000 t Trockenschlacke ausgelegt. Die Annahme der externen Trockenschlacke erfolgt über ein vollautomatisches Container-Handlingssystem, die Trockenschlacke der KEZO wird direkt über ein Transportband zugeführt. Nach der Eisenabscheidung erfolgt die Fraktionierung der Schlacke mit drei Siebmaschinen.

Aus dem Schlackenstrom der Korngrößen grösser 80 mm werden die Metallteile manuell separiert (Handsortierung), bevor dieser gebrochen und wieder der Eingangsschlacke zugeführt wird. Die Schlackenfraktionen 30–80 mm, 12–30 mm und 0.3–12 mm werden über Förderbänder direkt über Silos den vier Aufbereitungslinien zugeführt.

Die Staubfraktion kleiner 0.3 mm wird nicht aufbereitet und mit einem pneumatischen Transport direkt in den Reststoffsilo gefördert. Nach der Separation der Wertstoffe aus der Schlacke wird die Schlackenfraktion 30–80 mm auf kleiner

30 mm und die Schlackenfraktion 12–30 mm auf kleiner 12 mm gebrochen. Damit wird sämtliche Schlacke grösser 12 mm auf kleiner 12 mm gebrochen – mit dem Ziel, auch kleinste Metallagglomerate aus der Schlacke freizulegen. Die NE-Metalle der Fraktionen 0.3–12 mm werden weiter in eine Aluminium- und in eine Edelfraktion aufbereitet.

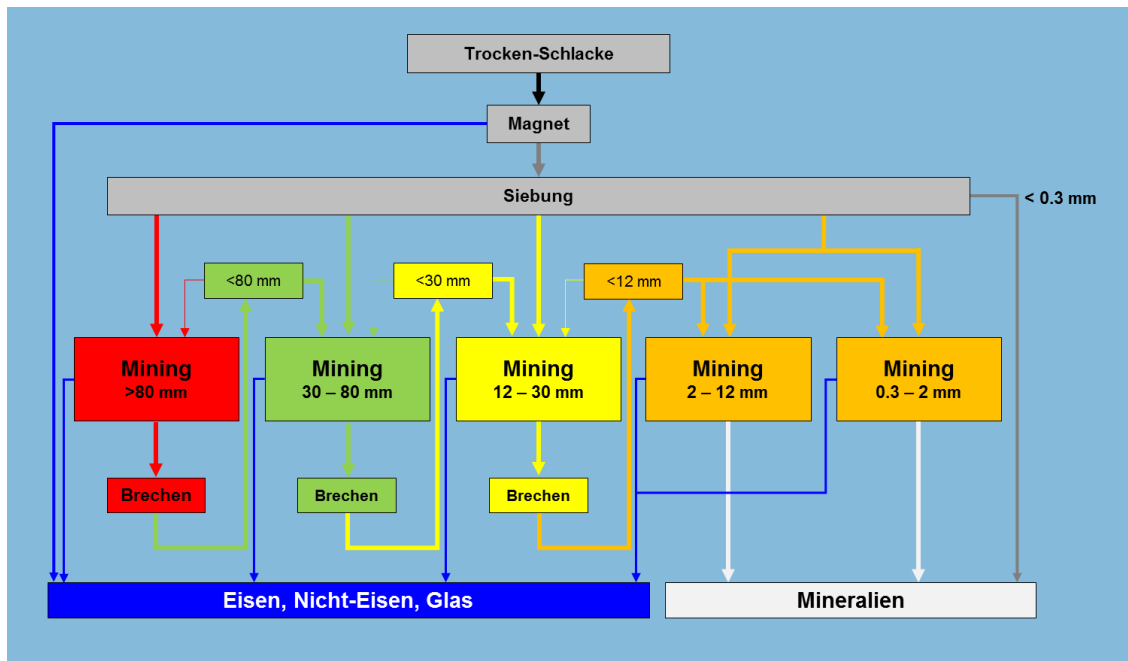


Abb. 1: Vereinfachtes Prozessschema der Aufbereitungsanlage für Trockenschlacke in Hinwil

Folgende Wertstoffe werden in dieser Anlage separiert und für den direkten Verkauf vorbereitet:

Eisen (FE)	> 80 mm, 30–80 mm, 12–30 mm, 2–12 mm und < 2 mm
Rostfreier Stahl (VA)	> 80 mm, 30–80 mm, 12–30 mm
NE-Metalle gemischt (NE)	> 80 mm, 30–80 mm, 12–30 mm
Aluminium (NE leicht)	8–12 mm, 5–8 mm, 1.2–5 mm, 0.3–1.2 mm
NE-Edel (NE schwer)	8–12 mm, 5–8 mm, 1.2–5 mm, 0.3–1.2 mm
Glas	12–30 mm

3 Beurteilung der Leistungsfähigkeit

3.1 Methodik

Um die Leistungsfähigkeit einer Schlackenaufbereitungsanlage zu beurteilen, gibt es verschiedene Methoden. Mit der Materialbilanz der Eingangs- und Ausgangsmaterialien kann die aktuelle Leistung der Aufbereitungsanlage aufgezeigt werden. Mit der Bestimmung der elementaren Metalle in der aufbereiteten Schlacke kann eine Aussage zum Wirkungsgrad der Anlage auf stofflicher Ebene (einzelne Metalle) und bezüglich der einzelnen Korngrössenspektren gemacht werden. In diesem Bericht wurden zur Beurteilung die Materialbilanz und der Restgehalt an elementaren Metallen herangezogen.

Materialbilanz

Mit der gravimetrischen Messung der verschiedenen Materialströme über eine grössere Betrachtungsperiode lassen sich die separierten Wertstoffe in Prozent der angelieferten Schlacke sehr genau ermitteln. Um vergleichbare Resultate mit anderen Anlagen zu erhalten, ist der Wassergehalt der angelieferten Schlacke sowie die Reinheit der separierten Wertstoffe zu berücksichtigen. Oft werden diese Werte umgerechnet auf trockene Schlacke (0% Wasser) und «reine» Wertstoffe angegeben.

Die daraus resultierenden Werte können mit denen anderen Aufbereitungsanlagen verglichen werden. Damit ist eine Beurteilung der Leistungsfähigkeit im Vergleich zu anderen Anlagen oder zum Stand der Technik möglich. Dies gilt aber nur, wenn die angelieferte Schlacke eine ähnliche Herkunft hat bzw. aus einem ähnlichen Abfallmix produziert wurde.

Für diesen Statusbericht wurden die Massenströme in den Betrachtungsperioden vom 1. Januar 2017 bis zum 30. April 2017 und vom 1. Mai 2017 bis zum 16. Juli 2017 ausgewertet.

Restgehalt elementarer Metalle

Der Restmetallgehalt (Nichteisenmetalle und Eisenmetalle) ist neben des Restkohlenstoffgehaltes die entscheidende Schlüsselgrösse für die ökologische Beurteilung der aufbereiteten Schlacke. Die Restmetallgehalte eignen sich aber auch für die Beurteilung der Leistungsfähigkeit der Aufbereitungsanlage.

Für die Qualität der Restmetallgehaltsbestimmung ist die Probenahme entscheidend, d. h. es muss sichergestellt werden, dass eine repräsentative Probe für die aufwändige Bestimmung des Restmetallgehaltes verwendet wird.

Will man die Vergleichbarkeit zu anderen Anlagen sicherstellen, muss neben einer analogen Probenahme auch sichergestellt werden, dass

- die angelieferte Schlacke eine ähnliche Herkunft hat bzw. aus einem ähnlichen Abfallmix produziert wurde, da die Höhe des Metallgehaltes in der Schlacke bei «konstantem» Wirkungsgrad der Anlage entscheidend ist.
- die Probenahme (Menge, Zeitpunkte, Zeitperiode, Korngrössenspektrum...) und Probenaufbereitung identisch stattgefunden hat.

Die nachfolgende Tabelle zeigt den mathematischen Zusammenhang, wie bei einem konstanten Wirkungsgrad der Metallseparation der Restmetallgehalt mit steigendem Metallgehalt in der Schlacke zunimmt.

		Metallgehalt in der Schlacke [%]										
		2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0
Anlagen- wirkungsgrad [%]		Restmetallgehalt [%]										
		85	0.300	0.375	0.450	0.525	0.600	0.675	0.750	0.825	0.900	0.975
	90	0.200	0.250	0.300	0.350	0.400	0.450	0.500	0.550	0.600	0.650	0.700
	95	0.100	0.100	0.125	0.150	0.175	0.200	0.225	0.250	0.275	0.300	0.325

Tab. 1: Zunahme des Restmetallgehalts mit steigendem Metallgehalt in der Schlacke bei konstantem Wirkungsgrad der Metallseparation

Vom 1. Mai bis zum 16. Juli 2017 wurde eine aufwändige, statistisch abgesicherte Probenahme der Hauptmaterialströme durchgeführt. Während 47 Tagen wurden die Proben in den relevanten Ausgangsströmen der Schlackenaufbereitungsanlage jeweils mehrmals pro Tag zu unterschiedlichen Zeiten genommen.

Ziel der Probenahme ist die Charakterisierung der Materialströme sowie das Aufzeigen von weiteren, noch nicht realisierten Metallpotentialen in der aufbereiteten Schlacke. Die Resultate dieser Analysen werden im November 2017 zur Verfügung stehen und in einem separaten Bericht zusammengefasst.

3.2 Übersicht der separierten Wertstoffe

Die nachfolgende Tabelle zeigt eine Zusammenfassung der separierten Wertstoffe in Tonnen während der Betrachtungsperioden sowie ihren Anteil bezogen auf die gesamte Schlackenmenge.

	01.01.17 bis 30.04.17 [t]	Anteil [%]	01.05.17 bis 16.07.17 [t]	Anteil [%]	01.01.17 bis 16.07.17 [t]	Anteil [%]
Rohschlacke	31 100	100.0	19 872	100.0	50 972	100.0
FE	3 182	10.2	1 860	9.4	5 051	9.9
NE-Metalle	1 342	4.3	975	4.9	2 317	4.5
VA	125	0.4	143	0.7	268	0.5
Glas	274	0.9	94	0.5	368	0.7
Ressourcen	4 924	15.8	3 072	15.5	8 004	15.7

Tab. 2 : Zusammenfassung der separierten Wertstoffe während der Betrachtungsperioden per Tonne sowie ihren Anteil bezogen auf die gesamte Schlackenmenge

Wie erwartet, variieren die Anteile der separierten Metalle in den verschiedenen Betrachtungsperioden. Trotz fehlender Erfahrungsdaten gehen wir heute davon aus, dass die Unterschiede auf das Eingangsmaterial zurückzuführen sind.

Beurteilung im Einzelnen:

- **Magnetisches Eisen (FE):** Mit 9.4–10.2% liegt die Ausbeute leicht unter den Erwartungen.
- **Nicht-Eisenmetalle (NE):** Mit 4.3–4.9% werden die Erwartungen deutlich übertroffen. Wir gehen davon aus, dass der Anteil von NE-Metallen in den Schlackenagglomeraten wesentlich höher ist als erwartet und dass das selektive Brechen einen Grossteil dieser NE-Metalle für die Separation freilegen (brechen) kann.
- **VA-Metalle und Glas:** Der Wirkungsgrad der Wertstoffabtrennung, aber auch die Qualität der Wertstoffe sind immer noch ungenügend. Eine Diskussion der Ausbeuten von VA und Glas soll daher erst nach weiteren Optimierungsschritten stattfinden.

3.3 Ausbeute FE-Metalle

Die vom 1. Januar bis zum 16. Juli 2017 separierte Eisenmenge von 5'051 Tonnen teilt sich in die folgenden Grössenfraktionen auf:

	[t]	Anteil [%]	Gehalt in Schlacke [%]
FE > 80 mm	3 345	66.2	6.6
FE 30 - 80 mm	600	11.9	1.2
FE 12 - 30 mm	691	13.7	1.4
FE 2 - 12 mm	148	2.9	0.3
FE fein	268	5.3	0.5
Total:	5 051	100	9.9

Tab. 3: Aufteilung der Grössenfraktionen in der separierten Eisenmenge

Bei der Prognose in der Projektplanung wurde von einem Eisengehalt in der Schlacke von 11% ausgegangen, wobei für die Eisenfraktion von grösser 5 mm ein Anteil von 9.3% und bei der Eisenfraktion kleiner 5 mm ein Anteil von 1.7% prognostiziert wurde.

Die separierte Eisenmenge lag damit rund 10% unter der Prognose. Die obige Tabelle zeigt, dass der Anteil der Eisenfraktion kleiner 12 mm in der Schlacke bei nur 0.8% liegt. Daraus kann abgeleitet werden, dass der Anteil der Eisenfraktion kleiner 5 mm signifikant tiefer liegt, als dies erwartet wurde. Die Eisenfraktion grösser 5 mm entsprach jedoch genau der Prognose.

Eine Ursache könnte sein, dass der selektive Brechprozess zwar entsprechend viel Eisen aus den Schlackenagglomeraten frei gelegt hat, dieses Eisen jedoch zu stark oxidiert ist und damit nicht mehr vom Überbandmagneten abgetrennt werden kann. Da das separierte Eisen noch nicht im Hause aufbereitet werden kann, beinhaltet die oben ausgewiesene Eisenmenge noch einen gewissen Anteil an Schlacke.

Erfreulicherweise konnte das Eisen grösser 30 mm trotzdem direkt in das Schmelzwerk oder auch zu Metallaufbereitern zu marktüblichen Preisen geliefert werden. Die FE-Fraktion kleiner 30 mm, rund 25% des separierten Eisens, musste jedoch noch gratis und zum Teil sogar noch mit Zuzahlungen für den Transport abgegeben werden. Aber auch wenn mit diesem Anteil keine Erträge erwirtschaftet werden konnten, wurde doch die Deponiemenge entsprechend reduziert.

3.3.1 Weitere Potentiale der FE-Gewinnung

Genauere Analysen zur FE-Gewinnung aus der Schlacke werden nach der Inbetriebnahme der Eisenaufbereitung der ZAV Recycling AG (Ende 2017) durchgeführt. Diese werden die Grundlagen für weitere Optimierungsmassnahmen sein.

3.4 Ausbeute NE-Metalle

Die in der Berichtsperiode (1. Januar bis 16. Juli 2017) separierte Menge von NE-Metallen von 2'317 Tonnen lag rund 30% **über** den Erwartungen. Da die NE-Metalle im **thermo-re®-Prozess** kaum oxidieren, können diese aus den Schlackenagglomeraten durch selektives Brechen freigesetzt und fast vollständig zurückgewonnen werden. Die separierten NE-Metalle teilen sich wie folgt auf:

Basis Schlackenmenge	01.01.17 bis 30.04.17 Anteil [%]	01.05.17 bis 16.07.17 Anteil [%]	01.01.17 bis 16.07.17 Anteil [%]
Aluminium 0.3 -12 mm	1.42	1.60	1.49
NE-Edel 0.3 - 12 mm	0.51	0.44	0.48
NE > 12 mm	2.39	2.86	2.58
Total:	4.32	4.90	4.55

Tab. 4: Aufteilung der NE-Metalle

Damit liegt der Anteil der NE-Metalle, welche kleiner 12 mm sind, bei 43.3%. Da die NE-Metalle kleiner 12 mm inline auf Trenntischen in eine Aluminium- und in eine NE-Edelfraktion aufgetrennt werden, kann deren NE-Edel- bzw. der Aluminiumanteil genau ermittelt werden. Der Anteil der NE-Edel-Fraktion, bezogen auf die NE-Metalle kleiner 12 mm, beträgt 24.4% und liegt damit innerhalb der Erfahrungswerte der Produktions/Pilotanlage der KEZO.

Die Tatsache, dass fast 0.5% NE-Edelfraktion (Fraktion mit hohem Silber-, Gold- und Palladiumanteilen) aus der Schlacke separiert werden konnte, beweist die Leistungsfähigkeit des **thermo-re®-Prozesses**.

Basis Schlackenmenge	01.01.17 bis 30.04.17 Anteil [%]	01.01.17 bis 16.07.17 Anteil [%]	Anteil [%]
NE-edel 0.3 - 1.2 mm	0.03	0.03	6.8
NE-edel 1.2 - 5.0 mm	0.11	0.11	23.6
NE-edel 5.0 - 8.0 mm	0.17	0.17	36.2
NE-edel 8.0 - 12.0 mm	0.17	0.16	32.2
Mischung*	0.02	0.01	1.3
Total	0.51	0.48	100.0

Tab. 5: Aufteilung der NE-Edelfraktion

*) Die Fraktion «Mischung» ist auf einen Siebbruch zurückzuführen und konnte daher nicht den üblichen Fraktionsgrößen zugeteilt werden.

Da man bis anhin nur Erfahrungen mit NE-Edelmetallen der beiden Fraktionen 0.2–1.2 mm und 1.2–5 mm (ohne selektiven Brechprozess) aus der Produktions/Pilotanlage der KEZO hatte, überrascht der hohe Silber-, Gold- und Palladiumanteil in den Fraktionen 5–12 mm. Auch zeigen die Auswertungen der Metallschmelzer bis anhin, dass die Anteile von Silber, Gold und Palladium sehr unterschiedlich sind und nicht direkt mit der Grössenfraktion korrelieren. Typische Anteile in der Edelfraktionen sind:

- Silber [g/t]: 2000 - 3500

- Gold [g/t]: 80 - 200
- Palladium [g/t]: 10 - 45

3.4.1 Weitere Potentiale in der NE-Metallgewinnung

Basierend auf den aktuellen Werten und den Erfahrungen mit der Aufbereitungsanlage kann die NE-Ausbeute aus der Schlacke weiter verbessert werden. Bei vergleichbarer Schlackenqualität scheint es möglich, den Anteil der separierten NE-Metalle aus der Schlacke auf über 5% zu steigern.

Folgende Optimierungspotentiale bestehen:

NE-Anteil in der magnetischen Schlacke

Messungen haben gezeigt, dass der NE-Anteil in der magnetischen Schlacke noch zu hoch ist. D. h. ein Teil der NE-Metalle kleiner 12 mm wird bereits vor den NE-Abscheidern mit der magnetischen Schlacke ausgeschleust und kann damit nicht vom NE-Abscheider separiert werden.

Massnahme: Mit einer besseren Abstimmung des Magnetfeldes vor dem NE-Abscheider sollte der Anteil der NE-Anteile in der magnetischen Schlacke deutlich reduziert werden können.

Wirkungsgrad des NE-Abscheiders Fraktion 3–4 mm

Messungen haben gezeigt, dass der optimale Wirkungsgrad der NE-Abscheider im Bereich der Fraktion 3–4 mm aufgrund der aktuellen Fraktionsgrößen nicht erreicht wird.

Massnahme: Mit einer neu entwickelten Magnettrommel der Firma SGM sollen die NE-Metalle im Fraktionsbereich 3–4 mm effizienter separiert werden. Sollte dies nicht gelingen, sind die Fraktionsgrößen entsprechend anzupassen.

Verlust von NE-Metallen im VA-Abscheider

Bei den NE-Metallen grösser 12 mm werden NE-Metalle mit dem VA-Abscheider ausgeblasen und gehen somit der NE-Fraktion verloren.

Massnahme: Optimierung des VA-Abscheiders

Eingeschlossene NE-Partikel

Messungen haben gezeigt, dass sich noch eingeschlossene NE-Partikel in der aufbereiteten Schlacke (0.3–12 mm) befinden.

Massnahme: Optimierung des Brechprozesses

Feinste NE-Metalle

Mit der Reduktion der Korngrösse der aufzubereitenden Schlacke von aktuell 0.3 mm auf 0.2 mm könnten weitere feinste NE-Metalle separiert werden.

Massnahme: Anpassung des Siebschnitts im Linearsieb

Mehr NE-Edelmetalle aus der Fraktion 12–15 mm

Der hohe Anteil der NE-Edelfraktion im Bereich 8-12 mm lässt vermuten, dass auch in der Fraktion im Bereich 12-15 mm mit einem erhöhten Anteil an NE-Edelmetallen zu rechnen ist.

Massnahme: Mit der Fraktionsgrössenanpassung in Richtung 15 mm könnten zusätzlich auch die NE-Edelfraktion aus dem Bereich 12–15 mm gewonnen werden.

Mit den Messresultaten aus der Restmetallbestimmung in der aufbereiteten Schlacke (Element- und Korngrössenbezogen) liegen dann bessere Grundlagen für die konkreten nächsten Optimierungsschritte vor.

3.5 Angelieferte Schlackenmenge

Folgende Schlackenmengen wurden in den verschiedenen Betrachtungsperioden seit dem 01.01.2017 angeliefert:

Schlackenherkunft	01.01.17 bis 30.04.17 [t]	Anteil [%]	01.05.17 bis 16.07.17 [t]	Anteil [%]	01.01.17 bis 16.07.17 [t]	Anteil [%]
ERZ Hagenholz	11'003	35.6	6'637	33.5	17'640	34.8
Satom	7'877	25.5	4'316	21.8	12'193	24.1
Horgen	1'862	6.0	947	4.8	2'809	5.5
KEZO	9'406	30.5	7'559	38.2	16'965	33.5
KEBAG	735	2.4	337	1.7	1'072	2.1
Total	30'882	100.0	19'797	100.0	50'680	100.0

Tab. 6: Angelieferte Schlackenmengen in den Betrachtungsperioden

Nach Abzug der Mengenabgrenzungen in den Silos und Containern standen der Aufbereitungsanlage die folgenden Schlackenmengen (Rohschlacke) zur Aufbereitung zur Verfügung:

	01.01.17 bis 30.04.17 [t]	Anteil [%]	01.05.17 bis 16.07.17 [t]	Anteil [%]	01.01.17 bis 16.07.17 [t]	Anteil [%]
Aufbereitung	30'684	98.7	19'579	98.5	50'263	98.6
Notaustrag	415	1.3	293	1.5	709	1.4
Schlackenmenge	31'100	100	19'872	100	50'972	100

Tab. 7: Zur Verfügung stehende Schlackenmengen in der Betrachtungsperiode

Wegen einzelnen Anlagenproblemen in der Aufbereitungsanlage und ungenügender Anzahl an Containern mussten rund 1.4% der Schlacke unaufbereitet an andere Aufbereitungsanlagen abgegeben werden. In den oben ausgeführten Ergebnissen sind diese (vernachlässigbaren) Mengen eingeschlossen, auch wenn diese keinen Beitrag zu den Ausbeuten an Metallen geleistet haben.

3.5.1 Zusammensetzung/Qualität der Schlacken

Um die Schlacken noch etwas genauer zu spezifizieren, wurden die Schlackenlieferanten angefragt, die Abfallzusammensetzung während des Betrachtungszeitraumes zu nennen. Über die Schlackenmengen wurde dann die mittlere Abfallzusammensetzung der angelieferten Schlacke gemäss Tabelle berechnet.

01.01.2017-16.07.2017	[%]
Siedlungsabfälle	53.1
Industrie- und Marktabfälle	32.9
Klärschlamm	2.7
Holz	7.9
VEVA RESH Auto	3.3
VEVA Resh Elektro	0.1
Total:	100

Tab. 8: Abfallzusammensetzung im Betrachtungszeitraum

Aufgrund der geographischen Verteilung der Schlackenlieferanten und des breit gestreuten Abfallmix kann davon ausgegangen werden, dass die angelieferte Schlacke einem schweizerischen Mittelwert entspricht. Die Tatsache, dass die Anlage KEBAG nur die Schlackenfraktion kleiner 12 mm aus einer umgebauten Ofenlinie anliefert, sollte bei einem Schlackenanteil von nur gerade 2.1% der angelieferten Schlackenmenge zu keiner signifikanten Verzerrung der verschiedenen Metallausbeuten führen.

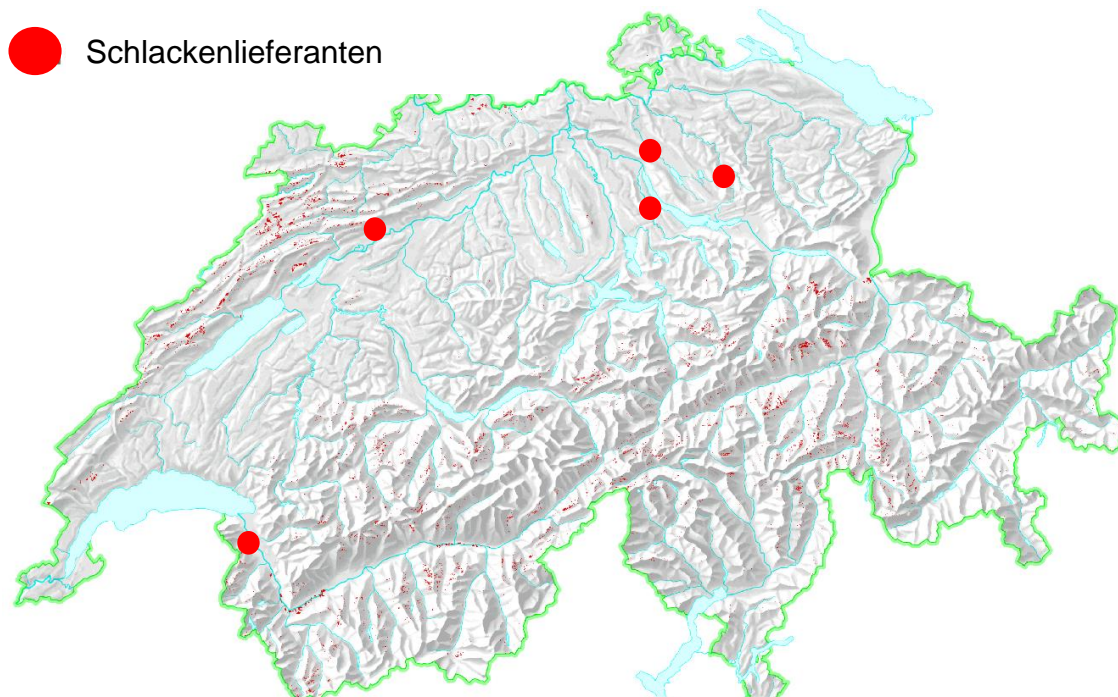


Abb. 2. Geografische Verteilung Schlackenherkunft (Quelle <http://wind-data.ch/windkarte/>)

Um die Effizienz des **thermo-re®-Prozesses** im Vergleich zum heutigen Stand der Technik in der Schlackenaufbereitung aufzeigen zu können, ist die Tatsache, dass die nachfolgenden Metallausbeuten aus einer schweizerischen durchschnittlichen Schlacke erzielt worden sind, von grosser Bedeutung.

3.6 Leistungsfähigkeit im Vergleich

Um die Leistungsfähigkeit der Aufbereitungsanlage beurteilen zu können, wurden verschiedene Schlackenaufbereiter angefragt, ihre NE-Ausbeutezahlen (ohne VA) zu nennen. Die untenstehende Tabelle zeigt die Zusammenfassung der Angaben:

		Aufbereiter				
		A	B	C	D	ZAVRE
separierter NE-Anteil (nass)	[%]	1.2	2.7	2.2	2.3	-
Wassergehalt in der Schlacke	[%]	15.0	15.0	15.0	15.0	0.0
separierter NE-Anteil (trocken)	[%]	1.4	3.2	2.6	2.7	4.6
Anteil Schlacke im NE	[%]	24.0	15.0	27.0	47.0	12.0
separierter NE-Anteil rein (trocken)	[%]	1.1	2.7	1.9	1.4	4.0

Tab. 9: NE-Ausbeute verschiedener Aufbereitungsanlagen

Zu den Angaben sind folgende Bemerkung zu machen:

- Die Aufbereiter A–D bereiten allesamt Nassschlacken auf und waren aufgefordert einen Mittelwert einer «durchschnittlichen» Schlacke zu nennen.
- Die Aufbereiter A–D arbeiten mit sehr unterschiedlich aufwendigen Aufbereitungsanlagen. Damit lassen sich auch die grossen Unterschiede in der Ausbeute erklären.
- Die NE-Ausbeute ist eine rein quantitative Aussage und sagt nichts über die Art der NE-Metalle (Kupfer, Silber, Gold, Palladium) aus.

Auch wenn die Angaben nicht exakt vergleichbar sind, zeigen die Werte die Vorteile der Trockenschlacke. Im direkten Vergleich mit der besten NE-Ausbeute eines Nassschlackenaufbereiteters (B) separiert die Schlackenaufbereitungsanlage der ZAV Recycling AG rund 50% mehr NE-Metalle.

3.7 Restmetallgehalt in der aufbereiteten Schlacke

Die VVEA schreibt vor, dass die KVA-Schlacke vor der Ablagerung von den Metallen entfrachtet werden muss. Das UMTEC, Rapperswil hat eine Messmethode entwickelt, um den Restgehalt der elementaren NE-Metalle in der aufbereiteten Schlacke zu ermitteln. Diese Methode ist im BAFU-Methodenband für die Ana-

lyse von Abfällen eingeflossen. Auffallend ist die Tatsache, dass alle unter Abschnitt 2.6 genannten Schlackenaufbereiter sehr ähnliche Restmetallgehalte in der aufbereiteten Schlacke ausweisen.

Die nach der UMTEC-Methode gemessenen NE-Restmetallgehalte aller Aufbereiter gemäss deren Angaben liegen in der Regel im Bereich von 0.4 – 0.8%. Daraus resultieren theoretisch NE-Gesamtgehalte der Rohschlacke im Bereich von 1.7 – 4.6% (= NE-Ausbeute + mittlerer Restmetallgehalt) in der nicht aufbereiteten Schlacke der o. a. Aufbereiter.

Da die betrachteten Schlacken aus einem mehr oder weniger ähnlichen Schweizer Abfallmix produziert worden sind, sind die sehr grossen Unterschiede nicht mit dem NE-Gesamtgehalt des Input-Materials erklärbar. Folgende Erklärungsansätze sind denkbar:

- Die für die Bestimmung des Restmetallgehaltes ausgewählte Schlackenfraktion von 2–16 mm ist nicht repräsentativ für die Bestimmung des Restmetallgehaltes in der Schlacke. Aufgrund unserer Erfahrung mit dem selektiven Brechen in der Aufbereitungsanlage der ZAV Recycling AG ist anzunehmen, dass sich in den Schlackenagglomeraten grösser 16 mm noch sehr viele NE-Metalle befinden, die von der UMTEC-Messmethode somit nicht erfasst werden (siehe auch 3.4, Ausbeute NE-Metalle). Die gilt natürlich auch für die Metalle der Fraktion kleiner 2 mm.
- Der Wirkungsgrad im Dauerbetrieb der Aufbereitungsanlagen unterscheidet sich sehr stark vom Wirkungsgrad während des Probenahmebetriebs.
- Die Probenahme ist zu wenig repräsentativ.

Dem BAFU wird empfohlen, die Messmethode für die Bestimmung des Restgehaltes in der Schlacke zu prüfen und entsprechend anzupassen.

4 Betrieb der Aufbereitungsanlage

4.1 Betriebsmodus «24-7-52»

Die Herausforderung, eine Schlackenaufbereitungsanlage im Betriebsmodus 24 Stunden–7 Tage–52 Wochen zu betreiben, wurde massiv unterschätzt. Zusätzliche grosse Probleme mit Anlagenlieferanten, welche ihre Garantiewerte nicht einhalten konnten, liessen lange keinen kontinuierlichen Betrieb der Anlage zu und führten deshalb immer wieder zu massiven Verzögerungen und Mehrkosten.

Immerhin wurde bereits Ende Oktober 2016 die angestrebte Verarbeitungskapazität der ersten Phase von rund 100'000 t Schlacke pro Jahr erreicht. Hingegen waren erst ab November 2016 alle fünf Separationslinien für die Verarbeitung der Schlackenfraktionen im Betrieb.

Sämtliche Bemühungen fokussieren sich bis heute auf den kontinuierlichen Betrieb der Anlage. Für die Optimierung der Anlage fehlt bis anhin die Zeit. Die Herausforderungen betrieblicher und logistischer Art forderten unsere Schichtmitarbeiter, unsere Mechaniker und Logistiker in den letzten 12 Monaten bis zum Äussersten.

Obwohl noch einige Modifikationen an der Anlage ausstehend sind und der notwendige Bestand an gut ausgebildetem Personal noch nicht erreicht ist, ist der Normalbetrieb nun aber absehbar. Ein Normalbetrieb ist nötig, damit sich das Betriebspersonal professionell um die Anlage kümmern kann und die geplanten Optimierungsmassnahmen umgesetzt werden können.

4.2 Abrasion

Unerwartet war der extrem starke Metallabtrag durch die Trockenschlacke in der Anlage. Auch die Verwendung von dicken Hardoxplatten an kritischen Stellen garantiert keinen nachhaltigen Schutz gegen die Abrasion. Es wurde erkannt, dass es nicht nur eine Lösung gibt, sondern dass je nach Belastung und Funktion verschiedene Massnahmen appliziert werden müssen. Ein nachhaltiger Abrasionsschutz der Anlage ist für einen kosteneffizienten Unterhalt (Material, Arbeitszeit, Anlagenstillstand) der Anlage allerdings von signifikanter Bedeutung. Folgende Massnahmen erfolgten:

Materialtaschen

Der Einbau von Materialtaschen ist mit Abstand die günstigste Massnahme gegen Abrasion. Die Materialtasche kann jedoch den Nachteil haben, dass sie den Materialfluss behindert und dadurch zu Verstopfungen führen kann, daher ist diese nicht überall einsetzbar.

Materialqualität

In den letzten zwölf Monaten wurden verschiedene abrasionsbeständige Materialien eingesetzt, jedoch ohne signifikant längeren Standzeiten zu erreichen. Zusammen mit den Firmen *Martin AG* und *Castolin Eutectic* werden zurzeit sehr vielversprechende Versuche mit aufgeschweissten Platten durchgeführt. Auch nach vierfacher Standzeit gegenüber der Hardoxplatten zeigen diese noch kaum Zeichen von Materialabtrag. Die Wirtschaftlichkeit für den Einsatz dieser Platten wird aktuell geprüft.

Quick-Change

Vom ZAR-Team wurde im Bereich der Materialführung ein neuer Kanaltyp entwickelt. Dieser erlaubt es, die Verschleissplatten an den kritischen Stellen sehr schnell von aussen zu wechseln.

Brecher 12–30 mm

Durch Spezialeinsätze in die Brechplatten konnten die Standzeiten der Brechplatten von 250 Stunden auf über 1'200 Stunden verbessert werden. Auch hier werden mit dem Brecherlieferanten *Gipo AG* weitere Anstrengungen unternommen, um die Standzeiten noch weiter zu erhöhen.

Umlenk- und Antriebstrommeln der Becherwerke

Bei den Becherwerken konnte nach einer Betriebsdauer von ca. 16'000 Stunden der Schieflauf des Bechergurtes nicht mehr sauber eingestellt werden. Die Analyse hat gezeigt, dass die Wölbung bei den Stegen der Umlenk- und Antriebstrommel soweit abgenutzt wurde, dass der Bechergurt nicht mehr geführt ist. Nach Empfehlung des Lieferanten *RUSSIG Fördertechnik GmbH & Co. KG* sollen neu Umlenk- und Antriebstrommeln mit wechselbaren Stegen eingesetzt werden, um das Problem schnell und kostengünstig zu lösen.

4.3 Schlackenfraktionierung/Siebung

4.3.1 Linearsieb

Mit dem für die Separation des Schlackenstaubs (kleiner 0.3 mm) eingesetzten Linearsieb konnte auch nach vielen Modifikationen weder der spezifizierte Durchsatz noch die für einen kontinuierlichen Prozess benötigte Betriebssicherheit erreicht werden. Die Linearsiebmaschine wurde deshalb vom Lieferanten zurückgenommen. Basierend auf den betrieblichen Erkenntnissen spezifizierte das ZAR-Team ein neues Linearsieb. Dieses wurde von der Firma *AVITEQ Industrietechnik GmbH* gebaut und ist seit Ende April 2017 in Betrieb.

Der Durchsatz konnte wie erhofft massiv gesteigert werden, was den Betrieb der Gesamtanlage wesentlich vereinfacht. Anfang September 2017 wird dann auch noch die zweite Linearsiebmaschine ersetzt. Die gute Performance der neuen Siebmaschine stimmt zuversichtlich, dass der Siebschnitt wieder von 0.3 auf 0.2 mm reduziert werden kann und damit die Ausbeute von feinstem Aluminium und feinstem NE-Edel weiter erhöht werden kann.

4.3.2 Scheibensieb

Mit dem Scheibensieb werden in der Schlackenaufbereitungsanlage der ZAV Recycling AG die Schlacken- und Metallteile grösser 80 mm für die Handsortierung abgetrennt. Obwohl die Abtrennung der Grobfraktion grösser 80 mm funktioniert, die Standzeit der Scheibenwellen sehr gut und der Energieverbrauch gering ist, kann das Scheibensieb die Anforderungen eines 24-7-52-Betriebs nicht erfüllen. Blockaden von Metall- und Schlackenteilen zwischen den Scheiben sowie die Tatsache, dass zu viele längliche Teile, wie Rohre, Leitungen etc. nicht zuverlässig abgetrennt werden, führen zu vielen Betriebsunterbrüchen.

Aufgrund der betrieblichen Erfahrungen wurden folgende Massnahmen umgesetzt oder sind in Planung:

- Die Scheiben auf der Siebwelle werden flexibel zwischen Gummischeiden gelagert.
- Die Anzahl Ecken auf den Scheiben wurde von sechs auf zehn erhöht und die Scheiben werden breiter ausgeführt.
- Die Anzahl der Scheibenwellen wird von 28 auf 6 Wellen reduziert, da die restlichen Wellen keinen grossen Beitrag zur zusätzlichen Fraktionierung mehr leisten.

Wir sind überzeugt, nach der Umsetzung aller Modifikationen, d. h. Verkürzung des Siebes und flexible Lagerung der Scheiben mit dem geeigneten Material, ein sehr effizientes System zur Abtrennung von Grobschlacke gebaut zu haben. Die nachfolgende Illustration zeigt das modifizierte Scheibensieb, wie es im Oktober 2017 eingebaut werden wird.

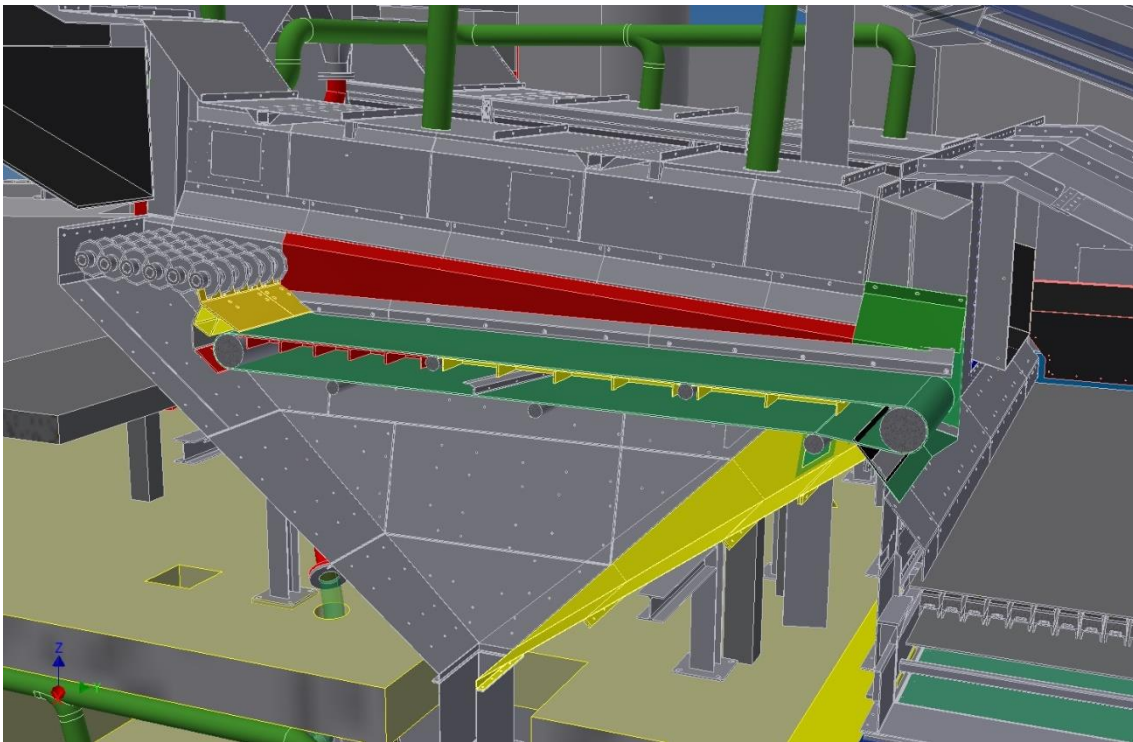


Abb. 3: Modifiziertes Scheibensieb

4.3.3 Nasensieb

Das vom ZAR-Team im 2015 entwickelte Doppelnasensieb hat sich im Betrieb bezüglich Fraktionierung, Wartungsaufwand und Standzeit gut bewährt.

Beim Einsatz als «Polizeisieb» nach dem Brecher, um die verpassten VA-Teile zu separieren, wurde festgestellt, dass sich in der VA-Fraktion auch noch zusätzliche Schlackenteile befinden.

Mit einer raffinierten Weiterentwicklung, sollte ein Schlackenkurzschlussstrom nicht mehr möglich sein. Damit wird die Qualität der über das Polzeisieb separierten VA-Metalle wesentlich verbessert. Der Einsatz des neuen Siebbelages ist für KW 37 geplant.

4.4 VA-Abscheider

Trotz umfangreichen Software-Anpassungen am ersten VA-Abscheider werden weder der spezifizierte Wirkungsgrad noch der Anteil der NE-Anteile in der VA-Fraktion erfüllt. Zurzeit ist auch nicht absehbar, dass der Lieferant eine Lösung des Problems aufzeigen kann. Da die Anlagen in ein System eingebunden sind, ist ein Lieferantenwechsel aber nicht ohne weiteres möglich. Hier werden aktuell verschiedene Szenarien geprüft, um das Problem nachhaltig zu lösen. Bis eine nachhaltige Lösung gefunden werden kann, müssen wir uns mit der momentanen Situation abfinden, welche folgende Konsequenzen hat:

- Kein Verkauf von hochwertigem VA-Material.
- Weniger Ertrag für NE-Material.
- Überwachung der Anlage während des diskontinuierlichen Betriebs, d. h. drei zusätzliche Manntage pro Woche.

4.5 Glasabscheider

Trotz verschiedener Optimierungsmassnahmen konnte die Zielsetzung einer Glasscherbenqualität mit einem Fremdanteil kleiner 2% und einer langen Standzeit der Optik noch nicht erreicht werden. Weitere Optimierungsmassnahmen sind nötig, um dieses ambitionöse Ziel zu erreichen.

4.6 Containerkran

Die durchschnittliche Anzahl an Ausfällen der Containerkrananlage ist immer noch hoch. Zurzeit läuft ein Zuverlässigkeitstest über acht Wochen. Anhand der Resultate wird das weitere Vorgehen zu definieren sein.

4.7 FE-Aufbereitung

Der Betrieb der Eisenaufbereitungsanlage musste bereits nach einer kurzen Betriebsphase wieder eingestellt werden. Die grosse Anzahl von Magneten in der Eisenfraktion führte immer wieder zu massiven Verstopfungen, so dass ein kontinuierlicher Betrieb nicht möglich war. Nach verschiedenen Modifikationen soll die Aufbereitung im September 2017 wieder in Betrieb genommen werden.

4.8 Energieverbrauch

Der durchschnittliche Stromverbrauch in der Berichtsperiode vom 1. Januar 2017 bis zum 16. Juli 2017 betrug rund 15.6 kWh pro Tonne Schlacke (exkl. Druckluft). Die Vorhersage wurde damit um rund 60% unterschritten.

5 Mineralische Fraktion

Der mineralische Anteil der Schlacke nach der Aufbereitung teilt sich auf die folgenden Fraktionen auf:

	bis 16.07.17 Anteil [%]	Qualität
Grobschlacke (2.0 - 12.0 mm)	36	A
Feinschlacke (0.3 - 2.0 mm)	11	
Schlackenstaub (< 0.3 mm)	14	B
magnetische Schlacke (0.3 -12.0 mm)	39	
Total	100	

Abb. 4: Mineralischer Anteil in der Schlacke

Der mineralische Restanteil wird den Schlackenqualitäten A und B zugeführt. Die Qualität A besteht aus der aufbereiteten Fein- und Grobschlacke (47%), welche auf dem Versuchskompartiment der *Deponie Chrüzlen* eingebaut wird. Die Qualität B, ein Gemisch aus dem Schlackenstaub und der magnetischen Schlacke wird, auf verschiedenen Deponien abgelagert.

Auf der Deponie Chrüzlen wurden bereits nach einer kurzen Zeit beim Umlagern der Schlacke Ammoniakemissionen festgestellt, die auch zu Reklamationen aus der Nachbarschaft führten. Die durchgeführten Emissionsmessungen zeigten Überschreitungen der MAK-Werte für den Maschinenführer in seiner Maschine, der nun mit einem speziellen Filter geschützt wird. Die Grenzwerte an der Deponiegrenze wurden jedoch nicht überschritten. Zusammen mit dem UMTEC, Rapperswil werden die Ursachen für die Freisetzung der Ammoniakemissionen untersucht.

6 Integrationsprojekt

Für die Handsortierung der Schlackenfraktion und die Aufbereitung des Eisens wurde im Oktober 2016 zusammen mit dem *Zürliwerk* ein Integrationsprojekt gestartet. Die Erfahrungen der letzten sechs Monate sind für alle Beteiligten sehr positiv. Wir gehen davon aus, dass wir nach der Inbetriebnahme der Eisenaufbereitung jeweils zirka 15 Mitarbeitern mit einer Behinderung einen sinnvollen Arbeitsplatz anbieten können. Ein extra dafür engagierter Arbeitsagoge übernimmt die fachmännische Betreuung des Teams.

7 Lärmemissionen

Die durchgeführten Lärmemissionsmessungen werden wie folgt beurteilt:

Die Immissionsgrenzwerte werden durch die Geräusche der Gesamtanlage sowohl am Tag als auch in der Nacht an allen Empfangspunkten eingehalten bzw. unterschritten.

Die neugebaute Schlackenaufbereitungsanlage, für sich betrachtet, führt jedoch an den Empfangspunkten im benachbarten Weiler Ober-Erlösen nachts zu einer Überschreitung des hierfür massgeblichen Planwertes von 1 dB. Tagsüber wird der Planungswert an diesen Empfangspunkten gut eingehalten.

An allen übrigen Empfangspunkten werden die Planungswerte sowohl am Tag als auch in der Nacht eingehalten. Mit technischen Massnahmen sollen Lärmemissionen an den 4 Hauptquellen soweit reduziert werden, dass die Auflagen diskussionslos eingehalten werden und die direkten Nachbarn zufrieden gestellt werden können. Mit den ersten Massnahmen zur Lärmreduktion wird in der KW 34 begonnen.

8 CO₂-Bilanz auf Basis der Metalle

Die Emissionsfaktoren für die Metalle sind auf der Basis der Metallgewinnungsprozesse berechnet worden, die in der *Ecoinvent-Datenbank*, Version 2.2, aufgelistet sind. Die gleichen Emissionsfaktoren wurden auch bei der CO₂-Vereinbarung zwischen dem UVEK und dem VBSA verwendet. Für die CO₂-Einsparungen durch das Rückführen der Metalle in den Stoffkreislauf werden die Metallausbeuten der einzelnen Metalle auf ein Jahr hochgerechnet. Da die Angaben für Blei und Zink von den Edelmetallschmelzern nur lückenhaft angegeben werden, wurden diese für die CO₂-Bilanz geschätzt.

Metalle	[tCO ₂ /t _M]	[t/J]	[tCO ₂ /t _M]
Eisen (Fe):	1.5	9 900	15 048
Aluminium (Al):	10.7	3 306	35 242
Kupfer (Cu)	1.4	662	900
Stahl rostfrei:	4.1	1 028	4 223
Zink* (Zn):	2.6	129	330
Blei* (Pb):	1.5	110	160
Gold (Au):	9 632	0.06	578
Silber (Ag):	427	1.90	811
Total			57 293

Tab. 10: Emissionsfaktoren gemäss Ecoinvent-Datenbank, Version 2.2 (* geschätze Werte)

Durch die Rückführung der Metalle in den Stoffkreislauf können knapp 60'000 Tonnen CO₂ eingespart werden. Dies entspricht etwa 18'000'000 l Heizöl.