



Berg Huettenmaenn Monatsh (2022) Vol. 167 (8): 361–367
<https://doi.org/10.1007/s00501-022-01262-y>
 © Der/die Autor(en) 2022

BHM Berg- und
 Hüttenmännische
 Monatshefte

Formsteine – Eine technische Lösung, um kupferhaltige Rest- und Kreislaufstoffe ofengängig zu machen

Lukas Marousek¹, Andreas Böhm¹, Thomas Tripolt¹ und Josef Pesl²

¹Lehrstuhl für Aufbereitung und Veredlung, Department Mineral Resources Engineering, Montanuniversität Leoben, Leoben, Österreich

²Montanwerke Brixlegg, Brixlegg, Österreich

Eingegangen 7. Juli 2022; angenommen 8. Juli 2022; online publiziert 29. Juli 2022

Zusammenfassung: Der Schachtofen stellt einen wesentlichen Prozessschritt dar, um geringer Cu-haltige, sekundäre Einsatzstoffe für die nachfolgende Raffination zu erschließen. Der Gegenstromreaktor setzt allerdings ausreichende Stückigkeit und Temperaturstabilität bei geeigneter chemischer Zusammensetzung voraus. Für den Einsatz fein- und feinstkörniger Stoffe wie Schlämme, Granulate und Krätzen, deren Wiedereinsatz betriebsintern im Sinne der Kreislaufwirtschaft sowohl ökologisch wie auch ökonomisch höchst sinnvoll ist, werden neue Agglomerations-techniken zur Stückigmachung benötigt. Eine Möglichkeit bietet die aus der Betonsteinindustrie bekannte, vergleichsweise kostengünstige Steinpresse.

Experimentelle Entwicklung nach der Methodik der statistischen Versuchsplanung führte systematisch von Kleinstversuchen im Labormaßstab mit speziell entwickelter Versuchsapparatur, über Pilotversuche, in denen Brikettgröße und Brikettform bereits mit dem industriellen Maßstab übereinstimmten, zur industriellen Anwendung. In der Prozessabfolge Dosieren, Mischen, Pressen, Aushärten wurden Rezepte für einzelne Einsatzstoffe auf Basis hydraulischer Bindemittel entwickelt, um die Festigkeit nach beschränkter Aushärtezeit zu optimieren.

Die Erkenntnisse konnten unmittelbar in die industrielle Praxis umgesetzt werden.

Schlüsselwörter: Agglomeration, Brikettierung, Kupferrecycling, Reststoff- und Kreislaufstoffmanagement, Nachhaltige Prozessführung

Moulded Bricks—A Technological Solution for Preparing Copper-containing Wastes and Recyclables for Use in the Shaft Furnace

Abstract: The shaft furnace as a core process step to prepare low grade secondary raw materials for copper refining requires a coarse feed for sufficient permeability, as well as material of sufficient temperature stability and proper chemical composition. During the course of copper refining a number of fine and finest grained materials like sludges, granulates, and scums are accumulated. The recycling of these materials, which is of high attraction both, from the economical as well as the ecological point of view, however, calls for new techniques of agglomeration. A briquetting press—well known from concrete industry—provides a comparatively low cost solution. The experimental development of the new application started with specially designed lab scale equipment using methods of statistical design of experiments. It was continued with pilot scale tests, within which shape and dimension of the briquettes already matched with the final process and successfully finished with the industrial implementation. Following the process steps of dosing, mixing, pressing, and hardening, recipes were tailored on the base of hydraulic binders in order to optimise compressive strength at restricted hardening time.

Keywords: Agglomeration, Briquetting, Copper recycling, Residue and waste management, Sustainable processing

1. Einführung und Problemstellung

Die Kupferhütte „Montanwerke Brixlegg“ ist ein Unternehmen mit langem historischen Hintergrund. Seit dem 15. Jahrhundert wurde nachweislich primäres Roherz aus unterschiedlichsten Abbaugebieten zu Kupfer- und Silbermetallen verschmolzen. In der Folge von immer geringeren Roherzliefermengen gewann die Wiederverwertung aus

Dipl.-Ing. L. Marousek (✉)
 Lehrstuhl für Aufbereitung und Veredlung, Department Mineral Resources Engineering,
 Montanuniversität Leoben,
 Franz-Josef-Straße 18,
 8700 Leoben, Österreich
lukas.marousek@unileoben.ac.at

hochwertigen Altmetall-Legierungen wie Messing, Bronze und Rotguss immer mehr an Bedeutung. Die Montanwerke Brixlegg beschäftigen sich daher seit mehr als 100 Jahren mit dem Recycling von Kupfer, Nickel, Zinn, Blei, Zink und Edelmetallen, wie Gold, Silber, Platin und Palladium. Seit 2002 ist die slowakische Kupferhütte Kovohuty a.s. in Krompachy ein Teil der Montanwerke Brixlegg AG. Wie auch in Brixlegg werden sekundäre Rohstoffe verarbeitet. Das in Krompachy produzierte Anodenkupfer wird, mit dem in Brixlegg produzierten, zu hochreinen Kupferkathoden weiterrefiniert [1].

Die vorgestellten Inhalte sind Auszüge aus Masterarbeiten, die am Lehrstuhl für Aufbereitung und Veredlung von Tripolt [2] und Marousek [3] im Rahmen des K1MET-Programmes in Kooperation mit den Montanwerken Brixlegg angefertigt wurden.

1.1 Prozesshintergrund – Kupferhütte Brixlegg

Das schematische Fließbild in Abb. 1 zeigt die wichtigsten Verfahrensschritte für die pyrometallurgische Aufarbeitung von Kupfer der Kupferhütte Brixlegg. Als erstes erfolgt das Einschmelzen und die Reduktion des Aufgabegutes im Schachtofen. Das dabei erzeugte sog. Schwarzkupfer wird im Konverter zu Rohkupfer oxidiert und anschließend im Flammofen (Anodenofen) zu Anodenkupfer verarbeitet. Schließlich wird das Anodenkupfer elektrolytisch zu hochreinen Kupferkathoden mit einem Kupfergehalt von ca. 99,997 % angereichert. Das erzeugte Kupfermetall wird

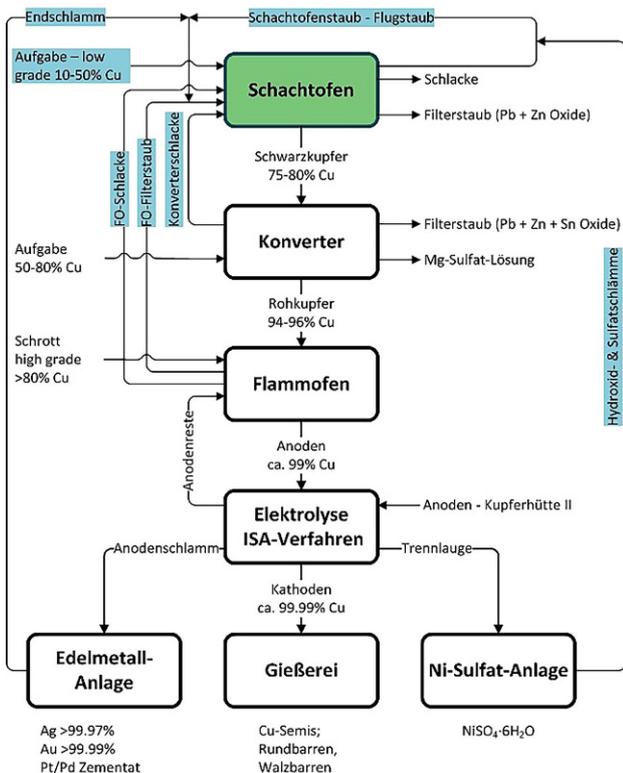


Abb. 1: Vereinfachtes Fließbild der Stoffkreisläufe in der Kupferhütte Brixlegg

je nach Kundenwunsch in der Gießerei zu Kupferhalbzeugen wie zum Beispiel Rund- oder Walzbarren verarbeitet. Bei Betrachtung des soeben beschriebenen Hauptprozessstranges fallen sofort die zahlreichen ein- und ausgehenden, sowie die im Kreislauf geführten Stoffströme auf. Die Qualität der Rest- und Kreislaufstoffe – vor allem Oxidationszustand, Reinheit und Kupfergehalt – bestimmen den Aufgabort bei der jeweiligen Prozessstufe. Je besser die Qualität des Einsatzstoffes ist, desto weiter fortgeschritten im Prozessablauf kann aufgegeben werden. Zugekaufte Kupferschrotte und Anodenreste der Elektrolyse können beispielsweise direkt im Flammofen eingeschmolzen werden. Dagegen müssen stark verunreinigte Recyclingstoffe, mit niedrigeren Kupfergehalten, in den Schachtofen aufgegeben werden.

1.2 Motivation

Die internen und externen Rest- und Kreislaufstoffe mit geringerer Qualität, in Abb. 1 farblich hinterlegt, liegen im Fokus dieser Arbeit. Diese Stoffe besitzen neben anderen Eigenschaften stark unterschiedliche Dispersitäten und sind teilweise so fein, dass sie nicht ohne Vorbehandlung in den Schachtofen eingesetzt werden können. Im Sinne der Circular Economy hat sich die Werksführung das Ziel gesetzt, den Anteil der Kreislaufstoffe zu erhöhen, indem eben diese feindispersen Rückstände verstärkt eingesetzt werden.

Nach ersten Voruntersuchungen [2] wurde als Verfahrensgrundlage die zementgebundene Agglomeration gewählt. Die Anforderungen an die erzeugten Agglomerate sind, dass die Reststoffe mit ausreichender Stabilität gebunden werden, im Unterofen gut aufschmelzen und die Gasdurchlässigkeit des Ofens gewährleistet bleibt. Eine Agglomeration soll schließlich auch Stoffverluste als „carry-over“ über den Abgasstrom minimieren.

2. Stoffbeschreibung

Die einzusetzenden Rest- und Kreislaufstoffe kommen aus der pyrometallurgischen, der hydrometallurgischen und der metallverarbeitenden Industrie. Wie in Abb. 1 angeführt, fallen interne Kreislaufstoffe vor allem über den pyrometallurgischen und hydrometallurgischen Weg an. Zu nennen sind diverse Schlacken, Krätzen, Aschen, Filterstäube und Schlämme. Neben den bereits erwähnten Quellen können externe Reststoffquellen auch aus der metallverarbeitenden Industrie, wie zum Beispiel Schleifstäube, sein. Von einigen Ausnahmen abgesehen, bilden die Reststoffe ein Gemenge, in dem die Metalle entweder als Oxide chemisch gebunden sind oder in metallischer Form vorliegen. Abb. 2 zeigt einen Überblick über einige der untersuchten Reststoffe. Bereits die optische Erscheinung lässt die unterschiedlichen physikalischen und chemischen Eigenschaften erahnen.

Um Einflussgrößen auf die Agglomerierbarkeit zu erfassen, wurde einleitend eine Reststoffcharakterisierung durchgeführt. Dabei wurden physikalische Eigenschaften, wie z. B. Partikelgrößenverteilung, Schüttdichte, und Feuch-



Abb. 2: Überblick einiger untersuchter Reststoffe

tegehalt, zum Zeitpunkt des Probeneingangs ermittelt, aber auch chemische Eigenschaften, wie die Löslichkeit von Schwermetallen, untersucht. Eine Zusammenfassung der Partikelgrößenverteilungen zeigt Abb. 3. Aus Übersichtsgründen wurde auf eine genaue Reststoffbezeichnung verzichtet, jedoch zeigt die Streuung der Korngrößenverteilungen die großen Dispersitätsunterschiede der Reststoffe.

Die 80%-Perzentile (k_{80} – Werte) der Durchgangsverteilungen reichen von ca. 50 μm bis 11 mm. Zusätzlich sind in der Grafik optimale Dispersitätsbereiche (Linien D1–D3) für Betonzuschläge mit einem Größtkorn von 8 mm nach

DIN 1045-2 [4] angeführt. Viele der Partikelgrößenverteilungen weichen weit vom empfohlenen Bereich ab. Unbenommen von den chemischen Eigenschaften zeigen die starken Dispersitätsunterschiede, dass die Einstellung der Partikelgrößenverteilung einen wichtigen Bestandteil in der Rezepturentwicklung einnimmt.

Abb. 4 zeigt die elementare Zusammensetzung von ausgewählten Reststoffen aus einer an Pulverpresslingen im Betriebslabor der Montanwerke Brixlegg durchgeführten Röntgenfluoreszenzanalyse. Reststoffe mit ähnlicher Bildung bzw. Herkunft wurden der Übersicht wegen gruppiert. Die Gehalte der Metallelemente Kupfer bis Zinn, vor allem aber Kupfer und Zink, rechtfertigen das große Interesse an einer Agglomeration. Der Kupfergehalt kann bei den untersuchten Reststoffen zwischen 4 und 80 % liegen, der Zinkgehalt variiert von 0,3 bis 66 %. Auch Blei und Zinn besitzen interessante Gehalte bis ca. 10 %.

Mit Hinblick auf eine zementgebundene Agglomeration können allerdings gewisse Elemente bzw. Verbindungen das Abbindeverhalten eines Zement-/Wasser-Reststoffgemisches beeinflussen und festigkeitsmindernd wirken. Eine Eluatwertanalyse nach EN 12457-4 [5] liefert einen ersten Eindruck, ob und welche Mengen an Ionen aus dem Reststoff in destilliertem Wasser innerhalb von 24 h gelöst werden. Die Messungen der elektrischen Leitfähigkeit und des pH-Wertes weisen auf die Konzentration an gelösten Ionen und die Wasserstoffionen-Aktivität in

Abb. 3: Übersicht über die Partikelgrößenverteilungen der verschiedenen Reststoffe. Der durch die Verteilungen D1–D3 eingehüllte Bereich zeigt den optimalen Dispersitätsbereich für Betonzuschläge für ein Größtkorn von 8 mm nach DIN 1045-2 [4]

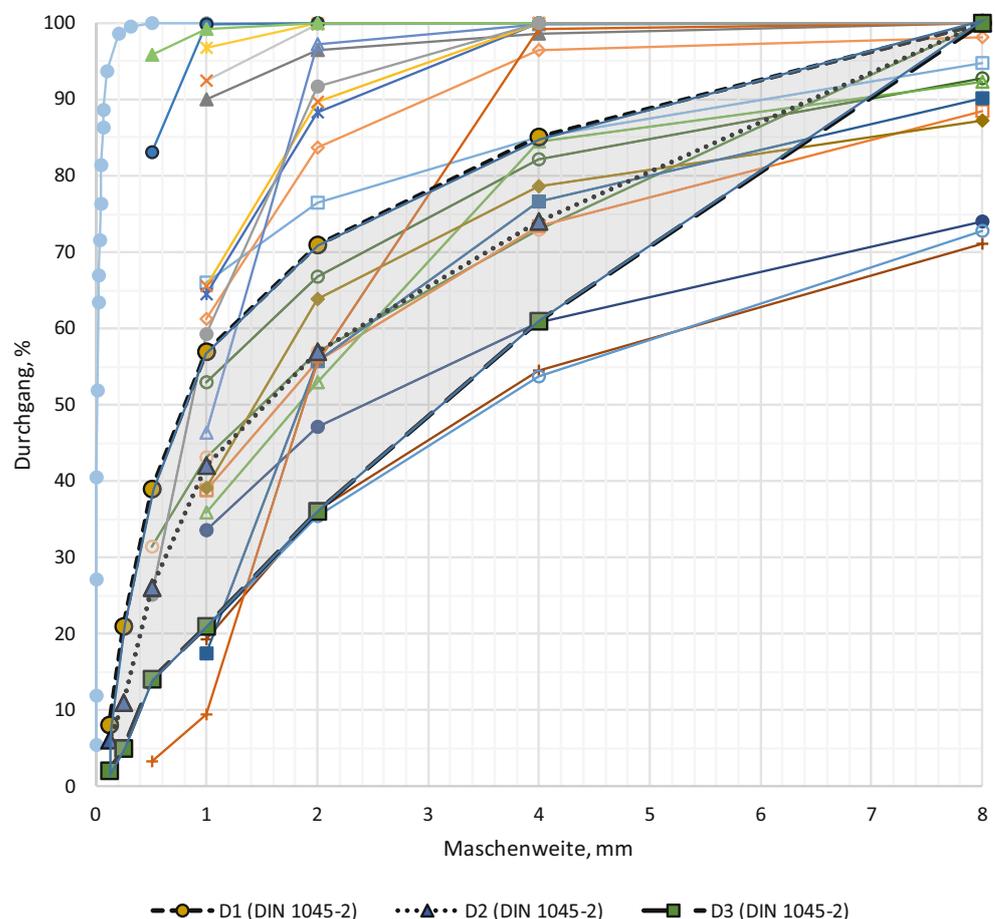
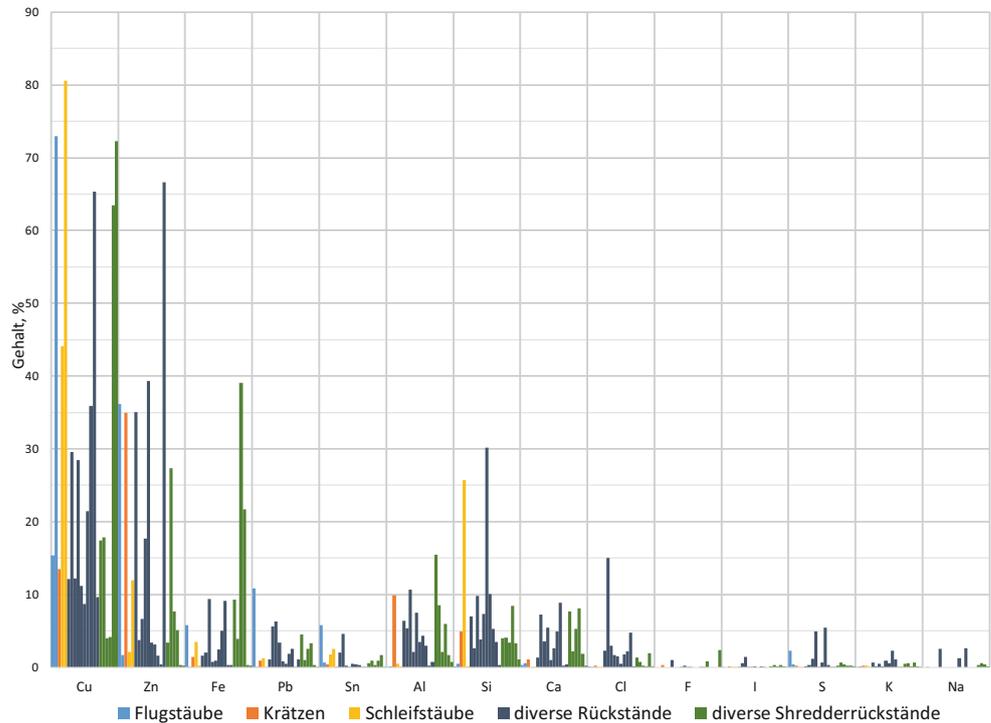


Abb. 4: Analysenergebnis ausgewählter Reststoffgruppen. Reststoffe ähnlicher Herkunft wurden gruppiert



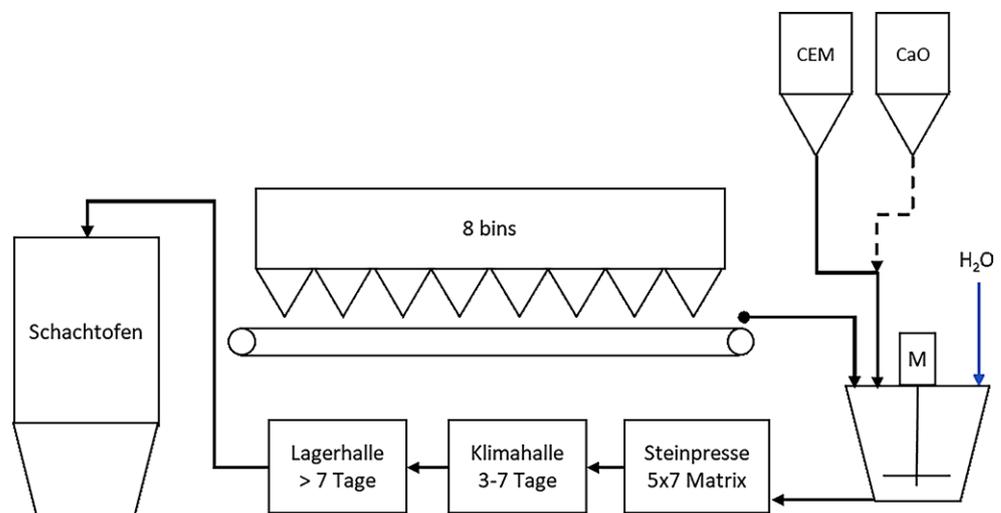
wässriger Lösung hin. Die Messungen der elektrischen Leitfähigkeit des Eluats ergaben Werte zwischen +60 und +7000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, sowie eine pH-Wertveränderung zwischen $\text{pH} \pm 0$ und +5. Leobner Leitungswasser besitzt vergleichsweise eine elektrische Leitfähigkeit von 179–553 $\mu\text{S}/\text{cm}$ [6]. Das erstellte Eluat wurde mittels ICP-MS-Analyse analysiert. Die Konzentration an gelösten Kationen, Blei, Zink, Kupfer, Molybdän, Mangan und Barium betrug zwischen 1 und 10%. Die erhöhten Werte bei bestimmten Reststoffen sind bereits erste Indikatoren für mögliche Probleme bei der Aushärtung des Zement-/Wasser-Reststoffgemisches.

3. Das Agglomerationsverfahren

3.1 Steinpresse

Die Auswahl der Betonsteinpresse als Agglomerations-technik erfolgte vorwiegend aufgrund der großen Vielfalt an Reststoffen und der sich daraus ergebenden Forderung nach einer gewissen Flexibilität gegenüber Eigenschaftsschwankungen, wie z. B. der Dispersität. Einfacher Maschinenschutz und hohe Prozessstabilität sprechen ebenso für die Technik, wie auch die einfache Bedienung und der geringe Wartungsaufwand. Die daraus zu erwartenden geringen Betriebskosten ergeben gemeinsam mit den geringen Investitionskosten die Entscheidungsgrundlage.

Abb. 5: Schematisches Fließbild der installierten Brikettier-anlage



Die im Schmelzhüttenwerk in der Slowakei installierte Brikettieranlage lässt sich wie in Abb. 5 schematisch darstellen. Je nach Rezeptur werden über ein Bunkeraufgabesystem die Reststoffe abgezogen und in einen Zwangsmischer unter Zugabe von Zement, Wasser und optionalen Additiven, vermengt. Die homogenisierte Rohmasse wird anschließend über ein Förderbandsystem in eine Steinpresse befördert, dort unter Pressdruck und simultaner Vibration zu Steinen verpresst. Nach erster Aushärtung in einer geeigneten Klimakammer werden die Steine palettiert und bis zu ihrem Einsatz in den Schachtofen zur Nachhärtung zwischengelagert.

3.2 Bindemittel Zement

Vorversuche mit verschiedenen Bindemitteln wie CaO, Ligninsulfonaten, Ca(OH)₂, Natriumsilikat und Zement zeigten, dass Zement bei den untersuchten Bindemittelanteilen von 5 und 10% am Gesamtgemisch am vielversprechendsten ist. Somit wurde Zement als Bindemittel für die Herstellung von Steinen gewählt. Bei Recherchen und Gesprächen mit Zementexperten zeigte sich, dass wenig Erfahrung zu den Wechselwirkungen zwischen den zu brikettierenden Reststoffen mit Zement während der Erhärtung vorhanden ist. Diese Tatsache ist in erster Linie der Mannigfaltigkeit der Reststoffeigenschaften geschuldet. Allerdings können einige entfestigend wirkende Einflussfaktoren aus der gut erforschten Zement- und Betontechnik übertragen werden:

- Zu hoher Anteil an Feinstpartikel und insbesondere der hygroskopisch wirkenden Feinstpartikel [7, pp. 52–59, 64, 166]
- Zu hoher Wasseranteil im Reststoff bzw. Wasser/Bindemittel-Wert (W/B-Wert) [7, pp. 31–36]
- Anteile von Komponenten wie Cl, F, SO₄ im Reststoff (z. B. Sulfatangriff von Beton [8, 9])
- Anteile von Komponenten mit Alkalimetallen, die zu einer sog. Alkali-Kieselsäure-Reaktion führen können [10]



Abb. 6: Bild eines Betonprüfkörpers aus Reststoffen. Die Ausblühungen an den Prüfkörperoberflächen weisen auf chemische Reaktionen während des Aushärtevorganges hin

- Elemente oder Verbindungen, die z. B. Cu, Pb, oder Zn enthalten, die auf unterschiedlichster Weise den Zementaushärteprozess stören können [11–13]

Erste Untersuchungen machten den negativen Einfluss bestimmter Reststoffe auf den Aushärteprozess des Reststoff-Zementgemisches offensichtlich (siehe Abb. 6).

Besonders hervorzuheben sind der hohe Feinstanteil, wie es bei Flugstäuben und Fällungsschlämmen der Fall ist. Eine hohe Oberfläche ist gemeinsam mit der chemischen Zusammensetzung des Reststoffes entscheidend für das Abbindeverhalten mit dem Wasser-Zementgemisch und kann schließlich zu unzureichenden Festigkeiten der Steine führen.

Mangelnde Kenntnis über die Reststoff-Wasser-Zementwechselwirkung machten eine systematische Untersuchung notwendig. Erst tieferes Verständnis der reststoffspezifischen Wechselwirkungen führt zu gezielten Rezepturempfehlungen.

3.3 Angewandte Testmethodik

Erst eine standardisierte Prüfkörperherstellung und Prüfkörperbewertung liefert vergleichbare und reproduzierbare Testergebnisse. Demzufolge wurden zwei Vorgänge vereinheitlicht, die Prüfkörperherstellung und die Festigkeitsüberprüfung. Die Prüfkörperherstellung beinhaltet den Mischvorgang, den Pressvorgang und den Aushärtevorgang während die Bewertung der hergestellten Prüfkörper über die zeitkontrollierte Messung der einachsigen Druckfestigkeit mit einheitlicher Belastungsgeschwindigkeit gelingt. Die dafür verwendeten Prüfpresen sind in Tab. 1 gelistet. Die MTS 815 wurde nur zur Bestimmung der Druckfestigkeit verwendet, wenn die zur Prüfkörperzerstörung erforderliche Druckkraft 5 kN überstieg.

3.4 Versuchsplanung und Wahl der Parameter

Die große Vielfalt an Einflussparametern, wie Temperatur, Partikelgrößenverteilung, Zementsorte, Feuchtigkeit, Reststoffart, Aushärtezeit, Pressdruck, Additive und mehr, erschwert die Bewertung deutlich. Der Versuchsaufwand erhöht sich mit jedem weiteren Parameter. Erste Voruntersuchungen konnten zwar dominante Parameter eingrenzen, jedoch konnten keine detaillierten Aussagen zu Intensität (Einflussstärke), Richtung (Tendenz zu einem von zwei vorab gewählten Grenzwerten) und Wechselwirkung der Parameter gemacht werden. Unter Verwendung eines vollfaktoriellen Versuchsplanes (2³-Plan) lassen sich die Einflüsse

TABELLE 1
Verwendete Prüfpresen an der Montanuniversität Leoben

Prüfpresse	Max. Druckkraft	Vorschubgeschwindigkeit
MIDI 10, Messphysik	5,3 kN	1 mm/min
MTS 815	1000 kN	1 mm/min



Abb. 7: Links: Die verwendete Pressvorrichtung zur Prüfkörperherstellung am Lehrstuhl für Aufbereitung und Veredlung; Rechts: Ein Beispiel eines frisch hergestellten Prüfkörpers

se bzw. Tendenzen dieser Parameter bei zwei gewählten Grenzwerten quantitativ bestimmen. Bei Wiederholung der Versuche ist man in der Lage, die Ergebnisse unter Angaben statistischer Sicherheiten zu interpretieren [14, 15].

3.5 Untersuchungen im Labormaßstab für ausgewählte Parameter und Grenzwerte

Im Labor wurde nun jeder Reststoff für sich untersucht [3]. Die Prüfkörper wurden alle mit derselben Grundrezeptur mit fixem W/B-Wert hergestellt. Der Mischvorgang im Labor wurde angepasst an die Verarbeitungsgeschwindigkeit und die benötigten Mengen manuell mittels Bohrmaschine und Rührwerksaufsatz nachgestellt.

Für den Pressvorgang wurde am Lehrstuhl für Aufbereitung und Veredlung eigens eine Pressvorrichtung konzipiert [2] (siehe. Abb. 7).

Der federgelagerte Senktisch, auf dem der Presszylinder sitzt, soll das Verkanten des Pressstempels vermeiden und stellt gleichmäßige zylindrische Prüfkörper mit einem Durchmesser von 3 cm und einer Höhe von 6 cm her. Es können damit Kleinstmengen an Reststoffen mit einer maximalen Partikelgröße von 3 mm untersucht werden. Die dabei verwendete Laborprüfpresse (Typ: Midi 10 der Fa. Messphysik) dient zum einen für die Herstellung der Prüfkörper und zum anderen für die Ermittlung der einachsigen Druckfestigkeit der Prüfkörper.

Der Aushärtevorgang wurde unter kontrollierten Bedingungen bei konstanter Luftfeuchtigkeit und bei einer Temperatur von 20 oder 40 °C in einer Klimabox [3] durchgeführt. Die Aushärtezeit betrug entsprechend dem Testplan 3 oder 7 Tage.

3.6 Untersuchungen im Pilotmaßstab

Nachdem die Reststoffe einzeln auf ihr Verhalten mit Zement und Wasser untersucht wurden, waren Rezeptvorschläge zu erarbeiten und zu testen. Die Laborprüfkörper sind aufgrund ihrer Größe und Geometrie für ein „Upscaling“ auf Industriemaßstab nicht günstig. Mit den kleinen



Abb. 8: Bild der Pilotsteinpresse in Brixlegg

Prüfkörpern kann zum einen nicht das ganze Partikelgrößenpektrum erfasst werden und zum anderen sind Mischvorgang und der Verdichtungsprozess statistisch aufgrund der geringen Mengen nicht ausreichend. Aus diesen Gründen wurde von den Montanwerken Brixlegg eine Pilotsteinpresse angeschafft, die in gleicher Art und Weise wie die Industrieanlage, aber in verminderter Anzahl, Steine herstellt (siehe Abb. 8). Die Pilotsteinpresse stellt vier würfelförmige Prüfsteine mit nahezu identischer Seitenlänge von 11 cm her. Der vorangehende Mischvorgang wurde durch einen Labor-Intensivmischer R01 der Fa. Eirich realisiert.

4. Ergebnisse

Die ersten durchgeführten Voruntersuchungen im Labor ergaben zufriedenstellende Festigkeiten der Prüfkörper ab einer Zementmenge von 10 m%. Bei Vergleich von Portlandzement CEM I und Zementsorten mit hohem Sulfatwiderstand, CEM II oder CEM III, konnten keine erkennbaren Festigkeitsunterschiede aufgezeigt werden. Als schwierige Reststoffe erwiesen sich vor allem Filterstäube und Fällungsschlämme. Hauptursachen dafür lassen sich unter anderem in der Feinheit (Reaktivität), in stark schwankenden Wassergehalten und in niedrigen pH-Werten begründen.

Die systematischen Laboruntersuchungen konnten eine verbesserte Festigkeitsentwicklung bei erhöhter Aushärtemperatur und Luftfeuchtigkeit aufzeigen. Diese Zusammenhänge sind auch aus der Betontechnologie bekannt [7, pp. 234, 247–248]. Reststoffe mit hoher Feinheit ergaben erwartungsgemäß geringere Festigkeiten. Für die meisten Reststoffe konnte ein Zement mit niedrigerer Reaktivität, wie z. B. ein Hochofenzement CEM III, empfohlen werden. Bei einigen Reststoffen wurden, nach einer Langzeitlagerung von ca. 90 Tagen aufgrund von Treiberscheinungen Gefügezerstörende Volumenvergrößerungen beobachtet.

Die Untersuchungen im Pilotmaßstab bestätigten die Ergebnisse der Laboruntersuchungen. Wie bereits ausgeführt, besitzen Steine eine höhere Festigkeit bzw. stabilere Aushärtung mit einem Zement mit niedrigerer Reaktivität. Rezepturen mit gröberer Partikelgrößenverteilung bzw. mit

einem geringeren Anteil an feinsten Reststoffen, wie Filterstäube, besitzen eine höhere Festigkeit.

5. Schlussfolgerung und erste Anlagen-erfahrungen

Mit dem vorgestellten Untersuchungsgang ist man in der Lage, kontinuierlich reproduzierbare Tests im Labor- und Pilotmaßstab zu tätigen und statistisch auszuwerten. Mit den Labortests können Kleinstmengen an Proben für Reststoffgemische untersucht werden, um Rezepturen einzugrenzen. Die Pilotanlage erlaubt industriennahe Versuche für statistisch abgesicherte Rezepturentwicklungen.

Grundlegend sollte bei einer derartigen Agglomeration zwischen zwei Hauptaspekten abgewogen werden, der Bindemittelmenge und der Lagerkapazität. Ein erhöhter Zement Einsatz bedeutet eine verkürzte Aushärtedauer für die Steine, mit dem Vorbehalt erhöhter Bindemittelkosten. Wählt man eine geringere Zementmenge, so benötigen die Steine eine längere Aushärtezeit. Größere Lagerkapazitäten sind daraus die notwendige Konsequenz.

Eine Anlage zur Herstellung von zementgebundenen Steinen wurde 2017 im Tochterwerk in der Slowakei installiert. Pro Schicht werden bis zu 50 t an Steinen hergestellt. Die Steine erhärten ca. drei Tage in einem Bretterregal unter klimatisierten Bedingungen. Danach werden die Steine für die vollständige Aushärtung palettiert und bis zum Einsatz im Schachtofen zwischengelagert. Es wurden Rezepte entwickelt, die alle gängigen Rückstände erfassen. Zufriedenstellende Festigkeiten können derzeit mit einer Zementmenge von 16 % erzielt werden. Eine Rezeptur setzt sich beispielsweise zu 60 % aus externen Rückständen, 15 % feinem Shreddergut, 12 % externen Stäuben und 13 % internen Stäuben und Rückständen zusammen.

In den Schachtofen wurden bis zu 40 t an Steinen pro Tag eingesetzt. So konnte der Durchsatz um ca. 15 % auf rund 200 t pro Tag gesteigert werden.

Danksagung. Die Arbeiten wurden im Rahmen des FFG-Forschungsprogrammes K1 MET durchgeführt. Das Forschungsprogramm des Competence Center for Excellent Technologies in „Advanced Metallurgical and Environmental Process Development“ (K1-MET) wird im Rahmen des österreichischen Kompetenzzentren-Programms COMET (Competence Center for Excellent Technologies) mit Mitteln des Bundesministeriums für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie, des Bundesministeriums für Digitalisierung und Wirtschaftsstandort, der Länder Oberösterreich, Steiermark und Tirol sowie der steirischen Wirtschaftsförderungsgesellschaft m.b.H. und der Standortagentur Tirol gefördert. Außerdem unterstützt die Upper Austrian Research GmbH das COMET-Zentrum.

Neben der Finanzierung durch das COMET Programm kommen die weiteren finanziellen Mittel für das gegenständliche Projekt von der Montanuniversität Leoben sowie von den Montanwerken Brixlegg AG.

Funding. Open access funding provided by Montanuniversität Leoben.

Open Access Dieser Artikel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Die in diesem Artikel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen.

Weitere Details zur Lizenz entnehmen Sie bitte der Lizenzinformation auf <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>.

Literatur

1. Montanwerke Brixlegg, A.G.: Unternehmensgeschichte – Montanwerke Brixlegg AG. <https://www.montanwerke-brixlegg.com/unternehmen/#Geschichte>, Zugriffen: 5. Juni 2022
2. Tripolt, T.M.: Brikettierung von Kreislaufstoffen der Kupferhütte der Montanwerke AG Brixlegg mittels Stempelpressen. Montanuniversität Leoben (2016)
3. Marousek, L.: Untersuchungen von industriellen Rest- & Kreislaufstoffen aus der Kupferhütte auf Brikettierbarkeit. Montanuniversität Leoben (2019)
4. DIN 1045-2:2008-08, „Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton – Teil 2: Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität – Anwendungsregeln zu DIN EN 206-1“ 2008.
5. ÖNORM EN 12457-4:2003-01, „Übereinstimmungsuntersuchung für die Auslaugung von körnigen Abfällen und Schlämmen“ 2003.
6. Stadtwerke Leoben: Prüfberichte-Wasserversorgung, 2022. <https://www.stadtwerke-leoben.at/wasserversorgung/>, Zugriffen: 10. Juni 2022
7. Grübl, P., Karl, S., Weigler, H.: Beton, Arten, Herstellung und Eigenschaften, 2. Aufl. Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH, Berlin: (2001)
8. Gasser, M.: Investigation on the occurrence of sulfate expansion. TU Clausthal (1987)
9. Chatterji, S., Thaulow, N.: Unambiguous demonstration of destructive crystal growth pressure. *Cem Concr Res* **6**(27), 811–816 (1997)
10. Röhling, S.: Betonbau; Hydratation-junger Beton-Festbeton. Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart (2012)
11. Garre, B.: Die Einwirkung von Belioxyd auf das Erhärten von Portlandzement. *Z. Anorg. Allg. Chem.* **169**(1), 305–308 (1928)
12. Lieber, W.: Effect of zinc oxide on the setting and hardening of Portland cements. *Zkg Int* **20**(3), 91–95 (1967)
13. Lieber, W.: The influence of lead and zinc compounds on the hydration of Portland cement. *Proc. Fifth Int. Symp. Chem. Cem.* **2**, 444–453 (1968)
14. Montgomery, D.C.: Design and Analysis of Experiments, 8. Aufl. John Wiley & Sons, Inc (2013)
15. Scheffler, E.: Statistische Versuchsplanung und -auswertung, 3. Aufl. Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Stuttgart (1997)

Hinweis des Verlags. Der Verlag bleibt in Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutsadressen neutral.