

Rückgewinnung sortenreiner RC-Baustoffe für einen Stoffkreislauf im Mauerwerksbau – Herausforderungen für die Verfahrenstechnik

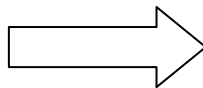
Einleitung

In der mineralischen Baustoffindustrie ist die Rückführung von Recyclingmaterialien an bestimmte Voraussetzungen gebunden. Das betrifft vor allem die Zusammensetzung rezyklierter Gesteinskörnungen aus dem Baustoff Beton sowie aus Verbundkonstruktionen im Mauerwerksbau [1]. Die Rückführung erfordert eine ausreichende **Sortenreinheit**, sichergestellt durch geeignete Aufbereitungsverfahren und Qualitätskriterien (Abb. 1). Aufgrund bautechnischer Anforderungen sind Fremd- und Störstoffe abzutrennen, was besonders für gipshaltige Bestandteile und Leichtbaustoffe gilt [2]. Im Gegensatz zu organischen Abfällen wie Holz oder Kunststoff, ist eine thermische Verwertung mineralischer Baustoffe nicht möglich. Sie verbleiben als fester Abfall oder, nach geeigneter Aufbereitung, als rezyklierte Gesteinskörnung. In den letzten Jahrzehnten wurden vermehrt komplexe Materialverbünde genutzt, die sich gegenwärtig noch im Gebäudebestand befinden und erst in den nächsten Jahren als mineralischer Bau- und Abbruchabfall freigesetzt werden. Ohne eine entsprechende Aufbereitung scheint es fraglich, ob sich so vom Gesetzgeber geforderte Stoffkreisläufe umsetzen lassen. Im Vergleich mit baustofftechnologischen Innovationen, werden beim Baustoffrecycling noch einfache Aufbereitungsverfahren eingesetzt. Es ist zu bezweifeln, dass diese für die Umsetzung geschlossener Stoffkreisläufe ausreichen.

Heterogenes Stoffgemisch



Aufbereitung



Aufschluss
Sortierung

Sortenreine Hauptbaustoffe



Abb. 1: Herstellung einer ausreichenden Sortenreinheit

Der Beitrag stellt Verfahrensabläufe vor, die zur Herstellung sortenreiner Gesteinskörnungen notwendig sind. Projektergebnisse können belegen, dass gegenwärtig eingesetzte Zerkleinerungsverfahren nur eingeschränkt für die Rückgewinnung von Wertstoffen nutzbar sind. Insbesondere der Aufschluss, d. h. die physikalische Trennung, von Materialverbünden erweist sich als sehr schwierig.

Folglich sind neue Konzepte zu erarbeiten, in denen Vor- und Nachteile gegeneinander abgewogen werden.

Verfahrensabläufe zur Rückgewinnung von Wertstoffen aus Verbundbaustoffen

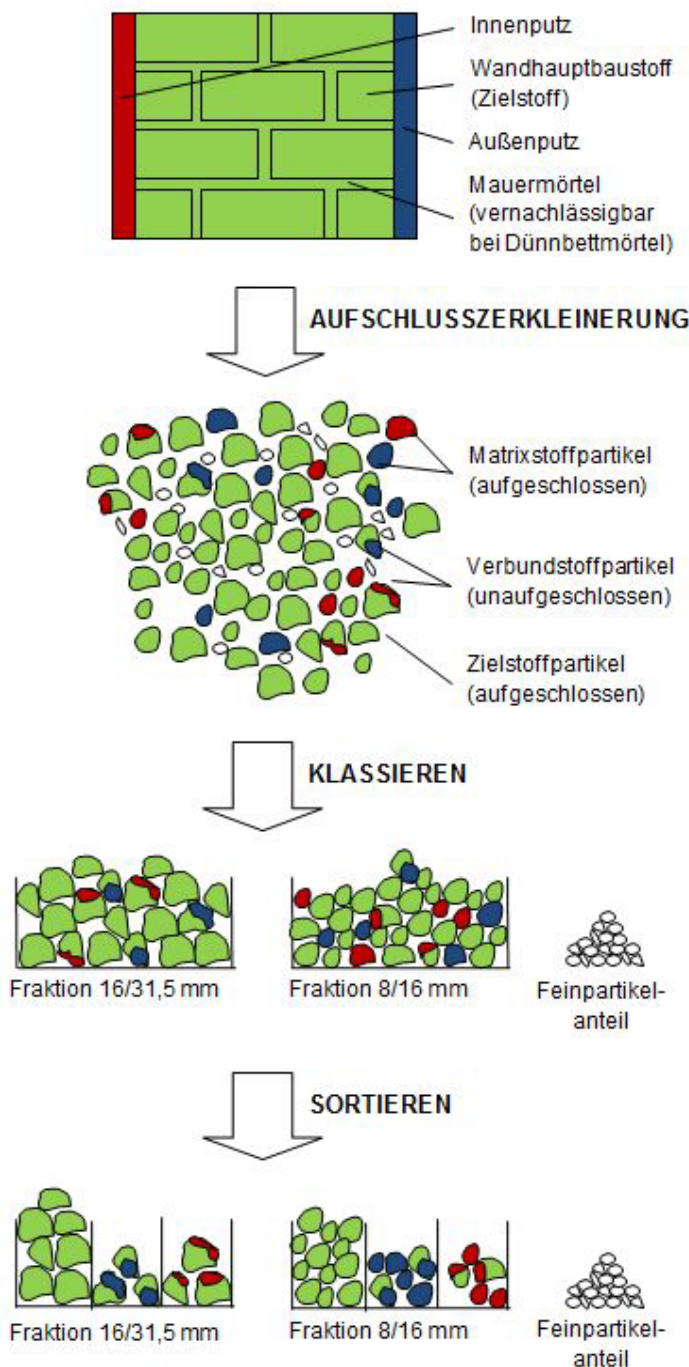
Für die Herstellung sortenreiner RC-Gesteinskörnungen aus Verbundbaustoffen im Mauerwerksbau sind verschiedene Verfahrensschritte nötig, die sich aus den in der mechanischen Verfahrenstechnik bekannten und notwendigen Vorgängen ergeben, um bspw. Eisenerze von taubem Gestein abzutrennen.

Je nach Material, das durch eine entsprechende Aufbereitung gewonnen wird, kann man die Einzelkomponenten anlehnend an [3] in **Ziel- und Matrixstoffe** unterteilen. Zielstoffe stellen dabei die Wertstoffe dar. Das ist im Mauerwerksbau i. d. R. das freigelegte, d. h. aufgeschlossene Steinmaterial. Bei unbewehrten Verbundkonstruktionen muss der Wandhauptbaustoff (Ziegel, Kalksandstein, Porenbeton, (Leicht-)Beton) von weiteren Mauerwerksbestandteilen (Putze und Mörtel) befreit werden. Putze und Mörtel bilden das Matrixmaterial, d. h. Fremd- und Störstoffe, die durch nachgestellte Sortierverfahren vom Wertstoff abzutrennen sind.

In Abb. 2 sind beispielhaft grundlegende Verfahrensschritte zur Herstellung sortenreiner, mineralischer Schüttgüter aus heterogenen Bau- und Abbruchabfällen dargestellt. Sortenreinheit bedeutet, dass die Wandhauptbaustoffe in ihrer reinen Form, ohne Anhaftungen, vorliegen. Hierbei ist der Aufschluss - die physikalische Auftrennung des Verbundes an den Grenzflächen - die Hauptvoraussetzung für nachfolgende Sortierprozesse.

Der Aufschluss in der Baustoffrecyclingindustrie erfolgt durch die Aufschlusszerkleinerung mittels Backen- und Prallbrecher [4], [5]. Dies bedeutet, dass parallel zur Herstellung eines polydispersen Partikelgemenges mit definierter Partikelgrößenverteilung einzelne Komponenten aufgeschlossen werden. Zerkleinerung und Aufschluss bedingen einander. Da sich bei einem unvollständigen Aufschluss Verbundpartikel bilden, ist ein sortenreiner Aufschluss anzustreben:

- Sich anschließende Sortierverfahren sind durch die Anwesenheit von Verbundpartikeln nur bedingt funktionsfähig, da diese Partikel eine Störkomponente darstellen und unerwünschte Bestandteile wieder in den Wertstoff eingetragen werden können.
- Die Verwertung von Verbundpartikeln erweist sich als äußerst schwierig, weil die Partikel keiner Komponente der verwendeten Baustoffsysteme zuzuordnen sind.



Ausgangszustand ist die intakte **Matrix einer Verbundkonstruktion**, die wieder in ihre einzelnen Bestandteile zerlegt werden soll.

Die einzelnen Wandbaustoffe sollen durch die **Zerkleinerung** in einem Brecher aufgeschlossen, d. h. von ihren Anhaftungen befreit werden.

Durch die Zerkleinerung wird ein **disperses, heterogenes Partikelsystem** erzeugt. Teilweise erfolgt der Aufschluss unvollständig, so dass nach der Aufschlusszerkleinerung Verbundpartikel aus mindestens zwei Stoffsystemen neben sortenreinen Partikeln vorliegen. Idealerweise sollte selektiv, d. h. an den Grenzflächen zerkleinert werden.

Bevor ein sortenreines Partikelgemenge produziert werden kann, ist zunächst die Einengung des Partikelbandes durch das **Klassieren** notwendig.

Durch sich anschließende Sortierverfahren soll das disperse, heterogene Partikelgemenge in ein **sortenreines, disperses Partikelgemenge** überführt werden. Insofern Verbundpartikel vorliegen, lassen sich diese nicht eindeutig einem Stoffsystem zuordnen. Die sortierten Partikelgemenge können in Wert- oder Reststoffe unterteilt werden. Durch die Zerkleinerung spröder Stoffe wird stets ein nicht unerheblicher Teil von nur schlecht sortierbaren feinen Partikelfractionen produziert.

Abb. 2: Verfahrensschritte zur Herstellung sortenreiner Schüttgüter, Zielstoffrückgewinnung aus einem Mauerwerksegment

Insbesondere bei Materialverbänden aus dem Mauerwerksbau muss das Ziel darin bestehen, sämtliche Stoffkomponenten aufzuschließen, um eine effiziente Sortierung durchzuführen. Als Nachteil der Aufschlusszerkleinerung erweist sich, dass ein nicht zu vernachlässigender Anteil feiner Gesteinskörnungen (bis zu 50 M.-% [6]), die sogenannten Recyclingsande, anfällt. Dieses Partikelgemenge ist unter technischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten nicht sortier-

bar. Verwertungslösungen existieren kaum. Nur grobe Gesteinskörnungen werden bisher in den Produktionskreislauf zurückgeführt. Daher ist eine übermäßige Aufschlusszerkleinerung zu vermeiden.

Durch selektiven Abbruch erfolgen Trennung und Sortierung in einigen Fällen bereits auf der Baustelle. Frei zugängliche Fremd- und Störstoffe werden entfernt, um möglichst sortenreine Stoffe zu gewinnen. Dies ist jedoch nur bei einfachen Gebäudestrukturen möglich. Magnetabscheider und Windsichter übernehmen gegenwärtig die maschinelle Sortierung von Bau- und Abbruchabfällen. Ziel ist die Abtrennung des Bewehrungsstahls sowie thermisch verwertbarer leichter Fraktionen (Pappen, Kunststoffe, Holz) aus dem mineralischen Massenstrom.



Abb. 3: Händische Sortierung grobzerkleinerter RC-Gesteinskörnungen

Mineralische Bau- und Abbruchabfälle werden anhand visueller Eigenschaften (Farbe und Beschaffenheit) durch das Personal händisch sortiert (Abb. 3). Es kommt zur Sortierung sehr grober Bestandteile, die aus der Vorzerkleinerung resultieren. Eine Sortierung aufschlusszerkleinerter Bestandteile ist unmöglich, was jedoch für die Rückführung von Wertstoffmaterialien unabdingbar ist. Die Trennung der mineralischen Bestandteile anhand ihrer Rohdichte ist aufgrund der Heterogenität und zu ähnlicher Rohdichten zwischen den Ziel- und Matrixstoffen kaum möglich.

Typisierung mineralischer Materialverbände

Anlehnend an der in [7] vorgeschlagenen Systematik für allgemeine Verbundwerkstoffe können in der Bauindustrie vorliegende Materialverbände anhand der in Abb. 4 dargestellten Hauptgruppen unterteilt werden.

Der **Verbundbaustoff**, bestehend aus mehreren zusammengesetzten Komponenten, die in ihrer Gesamtheit eine homogene Matrix bilden, stellt die einfachste Form eines Materialverbundes dar. Er weist im makroskopischen Betrachtungsbereich in allen Richtungen gleiche Eigenschaften auf und ist somit isotrop. Bekanntester Vertreter ist der Baustoff Beton, der aus Gesteinskörnungen und einer hydratisierten Zementsteinmatrix besteht. In der Matrix können außerdem strukturbildende Komponenten, wie bspw. Faserbewehrungen, vorliegen. Weitere Vertreter sind Kalksandsteine, Poren- oder Leichtbetone.

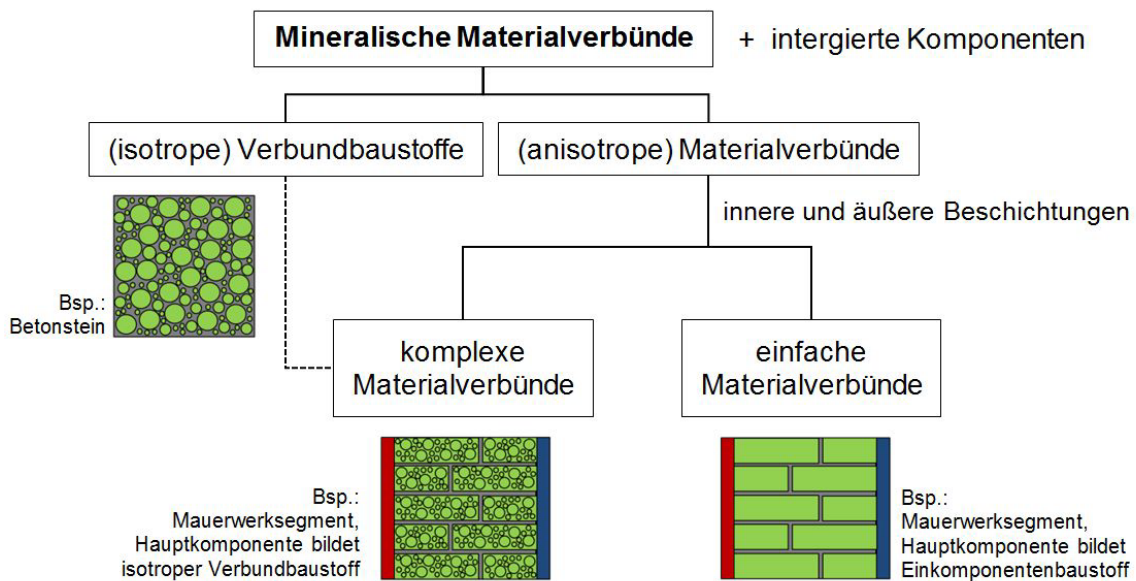


Abb. 4: Systematisierung mineralischer Materialverbünde, in Anlehnung an [7]

Anisotrope Materialverbünde bestehen aus einer Hauptkomponente (eine Betonwand oder ein Mauerstein), inneren und äußeren Beschichtungen (als Schichtverbund oder Oberflächenbeschichtungen) sowie ggf. nicht durchgängigen, integrierten Komponenten. Die Hauptkomponenten können isotrope Verbundbaustoffe (z. B. Beton bzw. Kalksandstein) oder Einkomponentenbaustoffe (bspw. Ziegel) sein. Anisotrope Materialverbünde mit einem isotropen Verbundbaustoff als Hautkomponentenmaterial bilden die hier definierten **komplexen Materialverbünde**. Werden hingegen Einzelkomponentenbaustoffe für die Herstellung eines anisotropen Materialverbundes verwendet, handelt es sich um einen **einfachen Materialverbund**. Die anisotropen Materialverbünde bilden in ihrer Gesamtheit die Konstruktion eines Bauwerkes.

Ein typischer Vertreter ist das Mauerwerk, da die Eigenschaften infolge innerer und äußerer Beschichtungen nicht in alle Richtungen gleich sind. Hauptkomponente ist der Mauerstein. Das Mauerwerk kann aus Steinen bestehen, die selbst aus einem isotropen Verbundbaustoff gefertigt wurden (bspw. Betonstein) oder aus einem Einkomponentenbaustoff (bspw. Ziegel). Die Fügung dieser Komponenten kann nach [7] einer stoff-, einer form- oder einer kraftschlüssigen Verbindung unterliegen. Hinsichtlich der physikalischen Trennung sind die Arten der vorkommenden Bindung von Bedeutung [8].

Beim Aufschluss anisotroper Materialverbünde entsprechen die Abtrennung der Beschichtungen und die Befreiung der Hauptkomponenten der primären Zielsetzung. Dabei ist es egal, ob die Hauptkomponente als isotroper Verbund- oder als Einkomponentenbaustoff vorliegt. Die Hauptkomponente bildet den Zielstoff, der durch geeignete Aufbereitungsverfahren zurückgewonnen werden soll. Als Beispiel sei hier die Gipsputz-Abtrennung von einem Betonmauerwerksegment genannt. Eine Zerstörung der Zielstoffmatrix ist nicht zwingend erforderlich, da der Putz von außen zugänglich und einfach vom Zielstoff abzutrennen ist. Auch im Falle integrierter Beschichtungen, wie bspw. Mauerwerksegment, Hauptkomponente bildet Einkomponentenbaustoff

Da vermehrt Mauerwerk im Dünnbettmörtelverfahren hergestellt wird, ist der Mörtel oftmals zu vernachlässigen, da er einen Massenanteil von weniger als 1 M.-% des Mauersteins ausmacht.

Handelt es sich um komplexe Materialverbünde, können in einem zweiten Prozessschritt Vorkehrungen getroffen werden, um die Zielstoffe freizulegen. Im Falle eines Betonmauersteins ist die Abtrennung des Zementsteines von der Gesteinskörnung gemeint. Hierbei ist nicht auszuschließen, dass durch die Anwendung neuartiger Aufbereitungsverfahren beide Prozessschritte in einem Verfahren umsetzbar sind.

Bei isotropen Verbundbaustoffen ist im Gegensatz zu Materialverbänden stets eine Zerstörung der gesamten Zielstoff enthaltenden Matrix erforderlich, um den Zielstoff freizulegen. Als Beispiel sei hier die Befreiung der groben Gesteinskörnung aus der Zementsteinmatrix zu nennen.

Einen Sonderfall stellen integrierte Materialkomponenten dar, durch die selbst isotrope Verbundbaustoffe, trotz ihres homogenen Gefüges, als anisotroper Materialverbund vorliegen können. Diese Komponenten sind zumeist im Hauptbaustoff integriert, wie z. B. der Bewehrungsstahl, und durchgängig oder lokal anzutreffen.

Seit einiger Zeit neigen Hersteller von Verbundbaustoffen dazu, neben einer durchgängigen Bewehrung funktionelle Komponenten zu integrieren, wie Wärmedämmstoffe in Hochlochmauersteinen (Abb. 5 und 6). Eine Abtrennung dieser Komponenten durch eine selektive Abbruchmaßnahme ist nicht mehr möglich. Erst nach einem vollständigen Abriss und ausreichendem Aufschluss können diese Komponenten vom Hauptmaterial abgetrennt werden.



Abb. 5 und Abb. 6: Beispiele für integrierte Komponenten – Wärmedämmung in einem Betonfertigteile (links) und einem Hochlochziegel (rechts)

Des Weiteren kommen ins Mauerwerk eingelassene funktionelle Komponenten, wie bspw. Kabel oder Rohre hinzu, die jedoch nicht Gegenstand weiterer Betrachtungen sind und Nebenkomponten darstellen.

Verfahren zur Trennung von Verbundbaustoffen

Bisherige Forschungsarbeiten beschränkten sich hauptsächlich auf die Rückgewinnung sortenreiner Gesteinskörnungen aus dem isotropen Verbundbaustoff Beton, da er die derzeit größte Masse an Bau- und Abbruchabfällen ausmachen dürfte. Verschiedene Technologien und Verfahren wurden bereits erprobt, um ein qualitativ höherwertiges Recycling zu ermöglichen. Als Beispiele lassen sich Neuentwicklungen, wie die Impulszerkleinerung [9], [10] oder die thermisch-mechanische Behandlung [10], [11], [12] zum Aufschluss der Gesteinskörnung aus Betonrezyklaten nennen. Untersuchungen zum Aufschluss anisotroper Materialverbünde wurden bislang nur in vereinzelt Fällen an Ziegelmauerwerk durchgeführt [13], [14].

Anforderungen an die Aufbereitung zukünftiger Bau- und Abbruchabfälle aus dem Mauerwerksbau

Derzeit sind in der Baustoff-Recyclingindustrie im Gegensatz zu anderen Recyclingbereichen, wie dem Glas- oder Metallrecycling, immer noch sehr einfache, aber dennoch bewährte Aufbereitungsverfahren anzutreffen. Gründe hierfür sind in ökonomischen Fragestellungen zu suchen. In kürzester Zeit müssen große Mengen anfallender Bau- und Abbruchabfälle verarbeitet werden. Die grundsätzliche Eignung der für die Aufbereitung komplexerer Bau- und Abbruchabfälle eingesetzten Verfahren ist zu hinterfragen. Dies ist seit längerem bekannt und Forschungsgegenstand unterschiedlicher Institutionen: [8], [15], [16].



Abb. 7: Ziegelabbruch mit integrierter Mineralwolle und Gipsputz

Im von der IAB Weimar gGmbH und der Bauhaus-Universität Weimar umgesetzten Projekt „Aufschlussverfahren zur Trennung von Verbundkonstruktionen“ [8] wurden vorhandene Aufbereitungsverfahren unter technischen Aspekten erprobt, um die Herstellung sortenreiner Schüttgüter aus RC-Gesteinskörnungen für geschlossene Stoffkreisläufe zu ermöglichen. Aufgrund der in den letzten Jahren immer häufiger verbauten Materialverbünde ist künftig mit einem stärkeren Anfall schwer zu bewältigender Bau- und Abbruchabfälle nach Abb. 7 zu rechnen. Dadurch steigt langfristig die Heterogenität der zerkleinerten, rezyklierten Gesteinskörnungen. Zu hinterfragen ist, ob inhomogene, nicht sortenreine RC-Gesteinskörnungen ohne weitere Aufbereitung einer sinnvollen Verwertung zugeführt werden können oder eine Deponierung die einzige Alternative ist. Hiervon ist die gesamte Baustoffindustrie betroffen. Dieses Problem haben die Industriellen Forschungsvereinigungen des Mauerwerksbaus erkannt. Es ist Forschungsgegenstand des industriegeführten Projektkonsortiums **SiM – Stoffkreislauf im Mauerwerksbau** [15].

Die meisten Forschungsarbeiten bezogen sich auf selektive Abrissmaßnahmen. Aufgrund komplexerer Gebäudestrukturen ist künftig ein solches Vorgehen zur Ausschleusung von Fremd- und Störstoffen zu überdenken. Es wird vermutet, dass viele Prozesse zu stationären Baustoffrecycling-Aufbereitungsanlagen verlagert werden, die durch eine effizientere Technik heute gültige, besser noch höhere Qualitätsstandards garantieren dürften.

Bau- und Abbruchabfälle unterliegen hinsichtlich ihrer physikalischen und chemisch-mineralogischen Eigenschaften einer starken Streuung [1]. Neben Ziegel, in einem thermischen Prozess erzeugt und folglich weitestgehend inert, sind mineralisch gebundenen Steine vorhanden, bei denen die Frage nach einem möglichen Reaktionspotential noch nicht beantwortet ist. Für die Herstellung sortenreiner RC-Gesteinskörnungen ist neben einem effektiven Aufschlussverfahren die Sortierung entscheidend. Diese sollte neben physikalischen (Einzelkorndruckfestigkeit, Rohdichte) auch anhand chemisch-mineralogischer Eigenschaften erfolgen, um neuartige Stoffströme zu erschließen. Hierbei gewinnen sensorbasierte Einzelkornsortierverfahren zunehmend an Bedeutung.

Aufschlussverfahren für Verbundkonstruktionen im Mauerwerksbau

In einem vom Projektkonsortium SiM betreuten Teilprojekt, gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie im Rahmen der Industriellen Gemeinschaftsforschung [8], wurden grundlegende Versuche zum Aufschluss von Verbundkonstruktionen im Mauerwerksbau durchgeführt. Zu klären war die Frage, ob konventionelle Aufbereitungsverfahren in der Lage sind, die Materialverbünde in ihre einzelnen Bestandteile zu zerlegen. Dazu wurden drei Brecher – Backen-, Prall- und Flachkegelbrecher – hinsichtlich ihrer Aufschlussqualität untersucht.

Die physikalische Bindung zwischen den einzelnen Komponenten können konventionelle Brechprozesse nicht immer aufheben. Ein oftmals unvollständiger Aufschluss und die Bildung von Verbundpartikeln sind die Folge. Im Gegensatz zur Aufschlussqualität wurden hinsichtlich der Partikelgrößenverteilung und -form signifikante Unterschiede festgestellt. Die genauen Untersuchungsergebnisse des Forschungsvorhabens können im Untersuchungsbericht [8] eingesehen werden und sind Gegenstand des Vortrages.

Das Aufschlussverfahren spielt hinsichtlich des maximal zurückzugewinnenden Anteils an rezyklierten Gesteinskörnungen, die in einem Stoffkreislauf zu halten sind, eine wesentliche Rolle. Es zeigte sich, dass vor allem die produzierte Masse an feinen Gesteinskörnungen und weniger der Aufschlussgrad den zurückgewinnbaren Wertstoffanteil beeinflusst. Die Menge an Verbundpartikeln ist gering. Diese wenigen Partikel können allerdings ein Problem für nachfolgende Sortierverfahren darstellen, da wiederum Störstoffe in das Wertstoffmaterial eingetragen werden können. In Abb. 8 ist beispielhaft die Zusammensetzung einer zerkleinerten, monolithischen, beidseitig verputzten Kalksandsteinwand durch die untersuchten Brechprozesse dargestellt.

Lediglich rezyklierte Gesteinskörnungen oberhalb einer Partikelgröße von 4 mm können in die erneute Produktion zurückgeführt werden. Der Aufschlussgrad hat eine untergeordnete Bedeutung für den theoretisch maximal zurückgewinnbaren Wertstoffanteil. In Abb. 9 ist für alle Produkte der zerkleinerten Wandkonstruktionen der infolge einer Sortierung zurückgewinnbare Wertstoffanteil im Vergleich zum Ausgangsmaterial (nicht zerkleinerte Wand) dargestellt. Je mehr Feinkorn < 4 mm gebildet wurde, desto niedriger die Wertstoffausbeute (Steinmaterial).

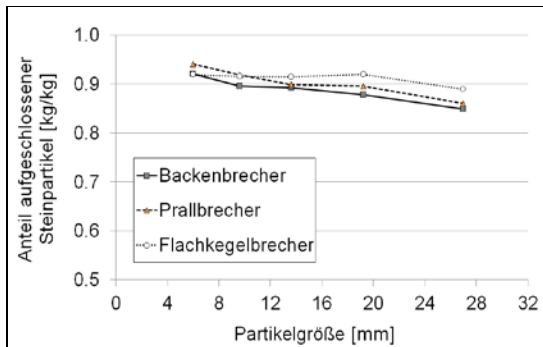


Abb. 8: Anteil aufgeschlossener Partikel im zerkleinerten Gemenge (Beispiel Kalksandsteinwand) [8]

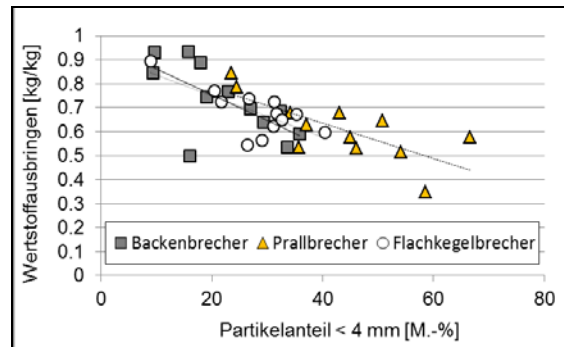


Abb. 9: Zurückgewinnbarer Wertstoffanteil [8]

Bei der Zerkleinerung im Prallbrecher findet eine signifikante Anreicherung von Gipsputzen in der feinen Gesteinskörnung, wie oftmals in der Literatur beschrieben [17], kaum statt. Gipsputzpartikel liegen als aufgeschlossene oder Verbundpartikel in der gesamten Wertstofffraktion vor. Durch eine nachträgliche, mechanische Aufbereitung infolge der Einleitung von Attritions- und Scherbeanspruchungen konnten vereinzelt anhaftende Bestandteile von den Wertstoffpartikeln abgetrennt werden. Auch eine selektive Zerkleinerung von Gipsputzen und somit eine Anreicherung in der feinen Gesteinskörnung war möglich. Als Nachteil erweist sich, dass wiederum eine nicht unerhebliche Menge feiner Gesteinskörnungen produziert wird.

Zusammenfassung

Die in der Baustoff-Recyclingindustrie dominierenden Aufbereitungsverfahren werden zukünftig nicht mehr in der Lage sein, Bau- und Abbruchabfälle mit höheren Anteilen an Materialverbänden in ihre ursprünglichen Bestandteile zu zerlegen. Dies betrifft insbesondere Verbände aus dem Mauerwerksbau, die in den nächsten Jahren in Form mineralischer Bau- und Abbruchabfälle freigesetzt werden. Für die Umsetzung geschlossener Stoffkreisläufe sind sortenreine rezyklierte Gesteinskörnungen gefordert, deren Herstellung ein Umdenken in der bisherigen Aufbereitung erfordert. Um die Herstellung derartiger Gesteinskörnungen mit dem derzeitigen Stand der Technik umzusetzen, sind folgende Szenarien denkbar:

1. Eine weitere Korngrößenreduktion mit herkömmlichen Zerkleinerungsverfahren erfolgt, um mehr Wertstoff zu befreien. Das bedingt die Anwendung geeigneter Sortierverfahren sowie verbesserte Verwertungsmöglichkeiten für feine Partikelgemenge.
2. Eine mechanische Aufbereitung schließt sich an, um an Wertstoffen anhaftende Fremd- und Störstoffe abzutrennen. Ebenso wie bei 1 geht nutzbarer Wertstoff durch die Bildung feiner Partikel verloren.
3. Sortierverfahren werden entwickelt, die eine Erkennung von Verbundpartikeln sowie die Ausschleusung von Fremd- und Störstoffen aus den Wertstoffen ermöglichen. Eine Sortierung sollte sowohl anhand physikalischer als auch chemisch-mineralogischer Eigenschaften erfolgen, um die Erschließung neuer Stoffströme zu befördern. Potentiale werden in der Anwendung sensorgestützter Einzelkornsortierverfahren gesehen.
4. Alternative Aufschlussverfahren kommen zum Einsatz oder werden entwickelt, die eine vollständige physikalische Trennung gewährleisten. Die Herstellung grober Gesteinskörnungen müsste maximiert werden unter Minimierung der Bildung feiner Gesteinskörnungen. Hierunter können auch verbesserte, effizientere selektive Abbruchverfahren verstanden werden.

Diese Thematik erfordert aufgrund ihrer Komplexität Verfahren, deren Wirtschaftlichkeit und Nachhaltigkeit ebenso im Gesamtkontext zu betrachten sind wie das Niveau der anschließenden Verwertung. Hierfür wird zukünftig ein vermehrter Forschungs- und Entwicklungsaufwand notwendig sein.

Quellenverzeichnis

- [1] Müller, A.; Rübner, K., Schnell, A.: Das Rohstoffpotential von Bauabfällen. In: Chemie Ingenieur Technik, 2010, 82 (11), S. 1861-1870.
- [2] Schulz, T.; Linß, E. et al.: Untersuchungen zum Gipsaufkommen im Bau-schutt in Hinblick auf die Optimierung des Abbruchs/Rückbaus sowie der Aufbereitung. Deutsche Gesellschaft für Abfallwirtschaft e.V., Berlin 2011.
- [3] Bunge, R.: Mechanische Aufbereitung: Primär- und Sekundärrohstoffe. Wiley-VCH Verlag, Weinheim 2012.
- [4] Müller, A.: Baustoffkreisläufe – Stand und Entwicklung (Tagungsbericht zur 15. Internationale Baustofftagung ibausil). F.A. Finger-Institut für Baustoffkunde, Weimar 2003.
- [5] Landmann, M.; Müller, A. et al.: New approaches for the mechanical processing of construction and demolition wastes from modern structures. In: Proceedings of the 13th European Symposium on Comminution and Classification, Braunschweig 2013. (zur Beitragsverfassung noch unveröffentlicht)
- [6] Ulsen, C. et al.: Production of recycled sand from construction and demolition waste. In: Construction and Building Materials, 2013 (40), S.1168-1173.
- [7] Schubert, G.: Zerkleinerungstechnik für nicht-spröde Abfälle und Schrotte. In: Aufbereitungstechnik 43, 2002, Nr. 9.

- [8] Landmann, M.; Seifert, G.: Aufschlussverfahren zur Trennung von Verbundkonstruktionen im Mauerwerksbau (Abschlussbericht IGF-Vorhaben 16617 BG). Weimar 2012.
- [9] Linß, E.: Untersuchungen zur Leistungsschallimpulszerkleinerung für die selektive Aufbereitung von Beton (Dissertation). Verlag im Internet, Berlin 2008.
- [10] Menard, Y. et al.: Innovative process routes for a high-quality concrete recycling. In: Waste Management, 2013, 33(6), S. 1561-1565.
- [11] Sui, Y.: Untersuchungen zu den Einflussgrößen der thermisch-mechanischen Behandlung für das Recycling von Altbeton sowie Charakterisierung der entstehenden Produkte (Dissertation). Verlag im Internet, Berlin 2010.
- [12] Mulder, E.; Feenstra, L.: Closed Cycle Construction – A process for the separation and reuse of the total C&D waste stream. In: Sustainable Construction Materials and Technologies, Taylor & Francis Group, London 2007.
- [13] van Dijk, K.: Closing the clay brick cycle (thesis). AVDS B.V., Noordwijk 2004.
- [14] Scheibe, W.; Grandissa, K.: Gewinnung von hochwertigem Ziegelsplitt aus Bauschutt (Abschlussbericht). UVR-FIA GmbH, Freiberg 2003.
- [15] Herbst, T. et al.: Nachhaltigkeitsanalyse für das Mauerwerksrecycling. In: Mauerwerk, 2012, 16 (5), S. 242-246.
- [16] Graubner, C.-A.; Clanget-Hulin, M.: Analyse der Trennbarkeit von Materialschichten hybrider Außenbauteile bei Sanierungs- und Rückbaumaßnahmen, Forschungsbericht F 2837. Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart 2013.
- [17] Gewiese, A.: Kreislaufwirtschaft im Bauwesen. Ernst & Sohn, Berlin 1998.