

Verwertung von Recyclingbaustoffen aus Mauerwerkbruch – Eigene Entwicklungen (Teil 3)

Prof. Dr.-Ing. habil. Anette Müller*

In den beiden ersten Teilen des Berichtes wurde ein Überblick zu Anfallmengen, Verwertungsquoten und Einsatzgebieten gegeben (Zi 06/2003, S. 17 und Zi 07/2003, S.42). Teil 3 beschreibt drei ausgewählte Verwertungsvarianten, die in eigenen Forschungsprojekten entwickelt wurden: Zierkiese aus Ziegelsplitt, reaktive Mehle aus Ziegelrestmassen und Blähgranulate aus Mauerwerkbruch.

Einleitung

In eigenen Arbeiten wurden Verwertungstechnologien für Mauerwerkbruch entwickelt, wobei der variierenden Stoff- und Kornzusammensetzung dieses Materials Rechnung getragen wurde. Zum einen wurden Varianten für sortenreine oder überwiegend aus Ziegeln bestehende Abfälle entwickelt und zum anderen Ansätze erarbeitet und erprobt, um heterogene, feinkörnige Ausgangsmaterialien zu neuen Produkten zu verarbeiten. Drei Beispiele dieser Entwicklungen werden vorgestellt.

Zierkiese aus Ziegelsplitt

Produktionsabfälle oder Bauabfälle, die überwiegend aus Vollziegeln bestehen, können zu Zierkiesen für die Gartengestaltung verarbeitet werden. Dazu müssen die aus den Ziegelabfällen hergestellten Splitte durch eine abrasive Beanspruchung gerundet und ihre Oberflächen geglättet und gesäubert werden.

Zur Umsetzung dieser Idee wurde zunächst die Effektivität einer solchen Beanspruchung ermittelt, die mit verschiedenen Aufbereitungsaggregaten erreicht werden kann. Eingesetzt wurden unterschiedliche Mühlen, in denen der Ziegelsplitt im Sinne einer Autogenmahlung – also ohne Mahlkörperfüllung – beansprucht wurde [56]:

- ▶ Labor-Schwingmühle: trockene Materialaufgabe mit Sand als Abrasivmittel
- ▶ Labor-Schwingmühle: nasse Materialaufgabe ohne Sand
- ▶ Mahltrommel mit Hubleisten: trockene Materialaufgabe ohne Abrasivmittel

Von den getesteten Varianten erwies sich die Mahltrommel als am besten geeignet. Deshalb wurden im nächsten Schritt Untersuchungen im Technikumsmaßstab in der Kugelmühle Super Orion 100/70 weitergeführt [26, 27]. Dabei wurden zwei unterschiedliche Versuchsabläufe (Bild 9) miteinander verglichen:

* Bauhaus-Universität Weimar, Fakultät Bauingenieurwesen, Professur Aufbereitung von Baustoffen und Wiederverwertung, D-99421 Weimar

Utilization of recycling construction materials from masonry rubble – Own developments (Part 3)

In the first two parts of the report an overview was given of the quantities occurring, utilization quotas and fields of use (Zi 06/2003, page 17 and Zi 07/2003, page 42). Part 3 describes three selected utilization alternatives which were developed in own research projects: Decorative gravels from brick chippings, reactive powders from brick residue masses and expanded granulates from masonry rubble.

Introduction

Utilisation technologies for masonry rubble were developed in own studies, whereby the varying material and grain composition of this material was taken into account. On the one hand variants were developed for pure-graded waste or that consisting predominantly of brick and on the other hand methods were worked out and tested, in order to process heterogeneous fine-grained starting materials into new products. Three examples of these developments were presented.

Decorative gravels from brick chippings

Production waste or building waste consisting mainly of solid bricks can be processed into decorative gravels for landscape gardening. For this purpose the chippings produced from the brick waste must be rounded by abrasive treatment and their surfaces smoothed and cleaned.

To put this idea into practice, first the effectiveness of such a treatment was determined, which can be achieved with various preparation machines. Different mills were used, in which the brick chippings were treated in the sense of autogenous (rock-on-rock) grinding – i.e. without a filling of grinding medium [56]:

* Bauhaus University of Weimar, Faculty of Construction Engineering, Chair of Preparation of Building Materials and Recycling, D-99421 Weimar

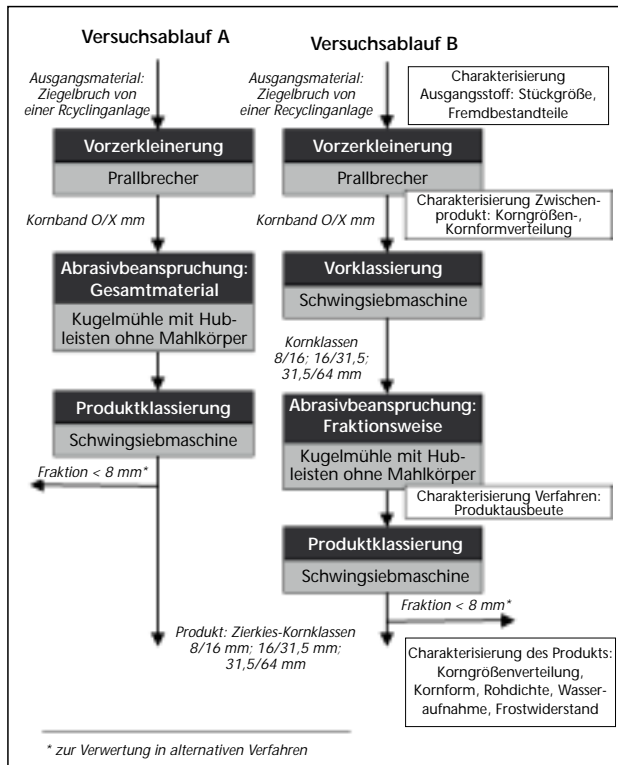


Bild 9: Versuchsabläufe der Zierkiesherstellung im Technikummaßstab

- ▶ Versuchsablauf A: das gesamte im vorgeschalteten Brechprozess erzeugte Kornband 0/X mm wurde in der Mahltrommel behandelt [26]
- ▶ Versuchsablauf B: Abrasivbehandlung erfolgte fraktionsweise und unter vorheriger Abtrennung der Feinfraktion 0/8 mm [27].

Das Ausgangsmaterial wurde vom Betreiber einer Bauschuttrecyclinganlage zur Verfügung gestellt. Es bestand aus gebrauchten, beschädigten Vollziegeln mit geringen Mörtelresten, wie es typischerweise beim Abbruch älteren Ziegelmauerwerks entsteht. Nach der Zerkleinerung im Prallbrecher wurde im Fall des Versuchsablaufs A das unfraktionierte Brechprodukt der zuvor gestürzten Kugelmühle aufgegeben, in der die Autogenbeanspruchung stattfand. Im Falle des Versuchsablaufs B wurde das Brechprodukt in Fraktionen zerlegt, die getrennt beansprucht wurden. Variiert wurden in beiden Fällen der Füllungsgrad (30, 40 und 50 %) und die Behandlungsdauer. Nach Abschluss der Behandlung wurde die Ausbeute als prozentuale auf die Materialaufgabe > 8 mm der Kugelmühle bezogene Menge aller Produktfraktionen 8/16 mm, 16/31,5 mm und 31,5/63 mm ermittelt.

An den erzeugten Produkten wurden die erreichten Kornformveränderungen mithilfe des optoelektronischen Korngrößenanalysators Haver-CPA 3-2 ermittelt. Bei dieser Methode werden die Projektionsflächen A_i einer ausreichenden Anzahl von Partikeln i erfasst, die im freien Fall die Abbildungsebene einer CCD-Zeilenkamera passieren. Aus dem Messdatenfile $[A_i; i = 0 \dots n]$ können dann verschiedene Kennzahlen für die Partikelgröße und die Partikelform und deren Verteilung berechnet werden. Bei den hier beschriebenen Untersuchungen wurde die Partikelform anhand der beiden im Bild 10 definierten Kennwerte dargestellt, die sich hinsichtlich ihres Aussagegehalts unterscheiden. So macht die Sphärität Aussagen zur Korngeometrie und zur Oberflächenrauigkeit. Der Idealwert von 1 wird nur von einer Kugel mit glatter

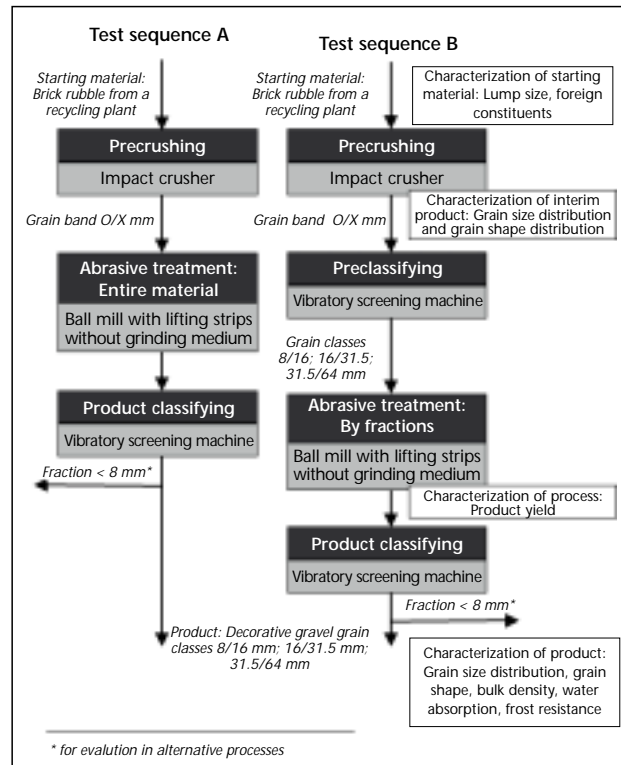


Fig. 9: Test sequences for the production of decorative gravel on technical college scale

- ▶ Laboratory vibration grinding mill: dry material feed with sand as abrasive agent
- ▶ Laboratory vibration grinding mill: wet material feed without sand
- ▶ Grinding drum with lifting strips: dry material feed without abrasive agent

Of the alternatives tested, the grinding drum proved to be the most suitable. Therefore, as a next step, investigations were continued on technical college scale with the ball mill Super Orion 100/70 [26, 27]. Here two different test sequences (Figure 9) were compared with each other:

- ▶ Test sequence A: the entire grain band 0/X mm produced in the preceding crushing process was treated in the grinding drum [26]
- ▶ Test sequence B: abrasive treatment took place by fractions and with previous separation of the fine grain fraction 0/8 mm [27].

The initial material was made available by the operator of a building debris recycling plant. It consisted of used, damaged solid bricks with small amounts of mortar residue, such as occurs typically with the demolition of older brick masonry. After size reduction in an impact crusher, in the case of test sequence A the crushed product, not separated into size fractions, was fed into the previously emptied ball mill, in which the autogenous treatment took place. In the case of test sequence B, the crushed product was separated into fractions, which were then treated separately. In both cases the degree of filling (30, 40 and 50 %) and the duration of treatment were varied. After completion of the treatment, the yield was determined as a percentage quantity, referred to the material feed > 8 mm of the ball mill, of all product fractions 8/16 mm, 16/31.5 mm and 31.5/63 mm.

The changes of grain shape achieved in the products were determined with the help of the optoelectronic grain size analyser Haver-CPA 3-2. With this method the projected areas

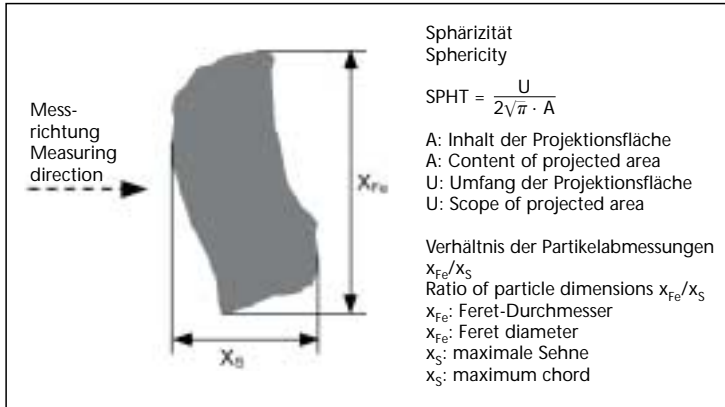


Bild 10: Definition der verwendeten Kornformmesswerte
Fig. 10: Definition of the applied measured values of grain shape

Oberfläche erreicht. Dagegen weisen sowohl glatte, von der Kugelform abweichende Kornformen als auch kugelförmige, aber raue Partikel Werte über 1 auf. Das Verhältnis der Partikelabmessungen macht Aussagen zum Schlankheitsgrad ohne Berücksichtigung der Oberflächenausbildung.

Die Ergebnisse der Technikumsuntersuchungen sind in Bild 11 zusammengefasst. Dem linken Diagramm ist zu entnehmen, dass die Ausbeute erwartungsgemäß mit zunehmender Behandlungsdauer abnimmt. Bei fraktionsweiser Beanspruchung ist die Ausbeute etwas größer, als wenn alle Fraktionen einschließlich des Feinkorns gemeinsam beansprucht werden. Das rechte Diagramm zeigt am Beispiel der Fraktion 16/31,5 mm die Entwicklung der mittleren Sphärizität während der Beanspruchung. Die Sphärizität wird während der ersten 15 Minuten am stärksten verbessert. Danach ist der Zuwachs geringer. Ein ausgeprägter Einfluss der Beanspruchungsart ist nicht zu erkennen.

Eine Gegenüberstellung der Verteilungen von Sphärizität und Länge-Breiten-Verhältnis $x_{Fe} : x_S$ der Partikel vor und am Ende der Beanspruchung zeigt Bild 12. Daraus geht hervor, dass der Beanspruchungsvorgang das Länge-Breiten-Verhältnis vergleichsweise wenig beeinflusst. Die Sphärizität steigt, besonders in den Sphärizitätsklassen nahe 1, dagegen deutlich an. Die Hauptabmessungen der Körner werden durch die abrasive Behandlung also wenig verändert. Vielmehr geht die erreichte Verbesserung der Sphärizität auf einen verminderten Kornumfang durch die Oberflächenglättung und den Abtrag von Ecken und Kanten zurück.

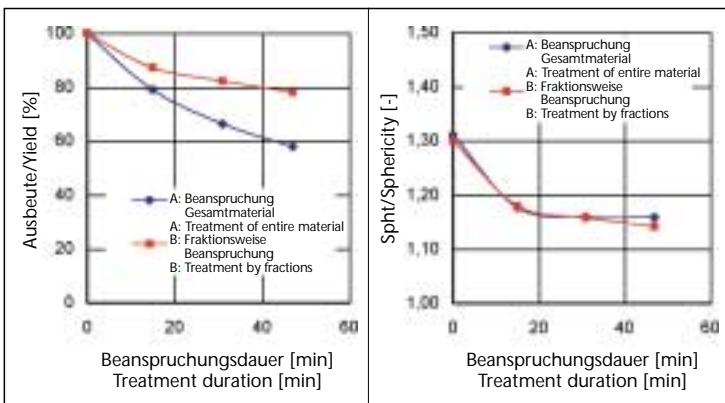


Bild 11: Abhängigkeit der Ausbeute bzw. der mittleren Sphärizität von der Beanspruchungsdauer für beide Versuchsabläufe
Fig. 11: Yield and mean sphericity respectively as a function of the treatment duration for both test sequences

A_i of a sufficient number of particles i are recorded, which pass the imaging plane of a CCD line camera in free fall. From the measured data file [$A_i; i = 0 \dots n$] different characteristic numbers can be calculated for the particle size and the particle shape and their distribution. For the investigations described here, the particle shape was represented on the basis of the characteristic values defined in Figure 10, which differ in regard to their information content. The sphericity makes statements on the grain geometry and on the surface roughness. The ideal value of 1 is achieved only by a sphere with a smooth surface. However, both smooth grain shapes deviating from the spherical form and spherical but rough particles have values over 1. The ratio of the particle dimensions makes statements on the slenderness ratio without taking the surface formation into account.

The results of the technical college examinations are summarized in Figure 11. From the diagram on the left it can be seen that, as expected, the yield decreases as the duration of the treatment increases. With treatment by fractions the yield is slightly higher than when all fractions including the fine grains are treated together. The diagram on the right shows the development of the mean sphericity during the treatment, based on the example of the fraction 16/31.5 mm. The sphericity shows the strongest improvement during the first 15 minutes. Afterwards the increase is smaller. A marked influence of the type of treatment cannot be recognized.

Figure 12 shows a comparison of the distributions of sphericity and length-width ratio $x_{Fe} : x_S$ of the particles before and at the end of the treatment. From this it can be seen that the treatment process influences the length-width ratio comparatively little. On the other hand the sphericity increases significantly, especially in the sphericity classes close to 1. The main dimensions of the grains are therefore changed little by the abrasive treatment. Instead the improvement of sphericity achieved is attributed to a reduced grain circumference due to smoothing of the surface and wearing down of corners and edges.

In addition to rounding the grain shape, the abrasive treatment in the ball mill shows a further positive effect: A selective "size reduction" occurs. All plaster and mortar residue adhering to the brick is removed. The decorative gravel produced consists of a homogeneous brick material, of which the colour differences are due to the different origin of the bricks in the masonry.

The three ornamental gravel fractions 8/16, 16/31.5 and 31.5/63 mm produced in the treatment process are shown in Figure 13. The medium and the coarse fractions are the most convincing in regard to their appearance. But also the grains of the fraction 8/16 mm are significantly rounded. Of the physical properties of the decorative gravel, in particular the frost resistance measured on the individual fractions deserves special attention. In conformity with the results quoted in Part 1 in the chapter: "Properties of recycling construction materials from masonry rubble", the good frost resistance values of brick grains are also confirmed by these investigations.

Reactive powders from brick residue masses

The production of reactive powders makes utilisable the fine fractions occurring in the production of decorative gravel, but also opens up high-quality application fields for heterogeneous mixtures. This approach is based on the working hypothesis that masonry rubble possesses pozzolanic properties which can be utilized by fine grinding to the grain size of

Die abrasive Behandlung in der Kugelmühle zeigt neben der Rundung der Kornform eine weitere positive Wirkung: Es kommt zu einer selektiven „Zerkleinerung“. Alle am Ziegel anhaftenden Putz- und Mörtelreste werden entfernt. Die hergestellten Zierkiese bestehen aus einem homogenen Ziegelmaterial, dessen Farbunterschiede auf die unterschiedliche Herkunft der Ziegel im Mauerwerk zurückzuführen sind.

Die drei im Beanspruchungsvorgang entstandenen Zierkiesfraktionen 8/16, 16/31,5 und 31,5/63 mm sind in Bild 13 dargestellt. Die mittlere und die grobe Fraktion überzeugen in Bezug auf das Aussehen am meisten. Aber auch die Körner der Fraktion 8/16 mm sind deutlich gerundet. Von den physikalischen Eigenschaften der Zierkiese verdient besonders der an den einzelnen Fraktionen gemessene Frostwiderstand Beachtung. In Übereinstimmung mit den in Teil 1, Absatz: „Eigenschaften von Recyclingbaustoffen aus Mauerwerkbruch“ zitierten Ergebnissen werden auch durch diese Untersuchungen die guten Frostbeständigkeiten von Ziegelkörnungen bestätigt.

Reaktive Mehle aus Ziegelrestmassen

Das Herstellen reaktiver Mehle macht sowohl Feinfraktionen nutzbar, welche bei der Zierkiesherstellung anfallen, eröffnet aber auch für heterogene Gemische hochwertige Einsatzgebiete. Dieser Ansatz basiert auf der Arbeitshypothese, dass Mauerwerkbruch puzzolanische Eigenschaften besitzt, die durch eine Feinmahlung auf Zementkorngröße nutzbar gemacht werden können. Damit könnten Mineralmehle erzeugt werden, die auf Grund ihrer Eigenschaften als Bindemittelkomponente im Zement oder als reaktiver Füllstoff im Beton verwendbar wären.

Puzzolanität ist die von bestimmten natürlichen Gesteinen wie zum Beispiel vulkanischen Aschen und Tuffen oder industriellen Nebenprodukten wie kalzinierte Tone und Steinkohlenflugasche bekannte Fähigkeit, mit dem bei der Hydratation des Zements gebildeten $\text{Ca}(\text{OH})_2$ zu reagieren. Als Reaktionsprodukte entstehen Calciumsilikathydrate, die zur Festigkeitsbildung im Mörtel oder Beton beitragen. Bei der Zugabe von puzzolanisch aktiven Mehlen zu einem Zement werden also zusätzliche, nicht aus dem Zement stammende Bestandteile in die Hydratationsreaktionen einbezogen. Damit wird das Defizit, das sich aus der „Verdünnung“ des Zements ergibt, zum Teil wieder ausgeglichen. Im Unterschied zur hydraulischen Reaktion verläuft die puzzolanische Reaktion allerdings langsam und liefert erst ab einer Erhärtungsdauer von 28 Tagen nennenswerte Festigkeitsbeiträge.

Wichtige Einflussgröße für die Puzzolanität ist der Gehalt der Mehle an puzzolanisch aktiven Bestandteilen. In Ziegelmehlen sind das reaktive Kieselsäure und reaktionsfähige Al_2O_3 -Verbindungen, die bei ausreichender Feinheit mit dem $\text{Ca}(\text{OH})_2$ reagieren. Ein aussagekräftiger Summenparameter für die Puzzolanität aus chemischen und granulometrischen Kennwerten kann aber bisher nicht angegeben werden. Die Beurteilung der Puzzolanität basiert deshalb hauptsächlich auf Festigkeitsmessungen.

In Fortsetzung früherer Untersuchungen sollte an Mineralmehlen, die aus ungebrauchten Ziegeln und Mauerwerkbruch hergestellt wurden, der durch die Puzzolanität verursachte Beitrag dieser Mehle an der Festigkeitsbildung von Mörteln überprüft werden [19]. Die Mehle wurden in einer Chargenkugelmühle aufgemahlen und im Verhältnis 1 : 5 mit Portlandzement gemischt. Aus den Mischungen wurden Norm-

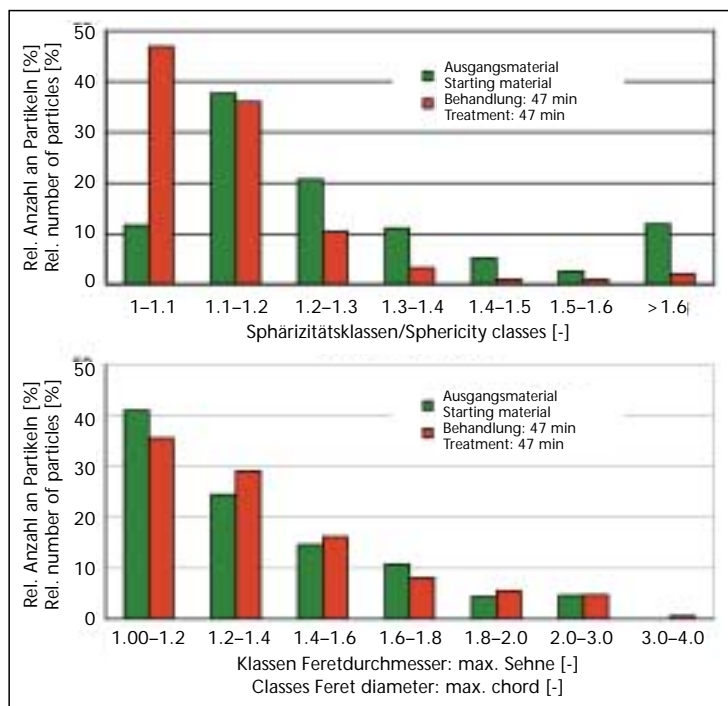


Bild 12: Veränderung der Kornformverteilung in der Fraktion 16/31,5 mm durch die Beanspruchung (Versuchsablauf B)

Fig. 12: Alteration of the grain shape distribution in the fraction 16/31.5 mm by the treatment (test sequence B)

cement. In this way mineral powders could be produced which, on account of their properties, would be utilisable as a binding agent component in cement or as a reactive fill material in concrete.

Pozzolanicity is the capability, known from certain natural rocks such as volcanic ashes and tuffs or industrial by-products such as calcined clays and coal fly ash, to react with the $\text{Ca}(\text{OH})_2$ formed in the hydration of cement. Therefore, with the addition of pozzolan active powders to cement, addi-

		8/16 mm	16/31.5 mm	31.5/63 mm
Rochdichte Bulk density [g/cm³] mit GeoPyk 1360 with GeoPyk 1360	A	1.80	1.75	
	B	1.73	1.74	
Wasseraufnahme Water absorption [%]	A	14.3	14.1	
	B	14.1	13.1	
Absplitterung nach 10 Frost- Tauwechselln [Masse-%] Splintering after 10 freeze-thaw cycles [% by mass]	A	2.62	2.20	1.02

Bild 13 : Erscheinungsbild der nach Versuchsablauf A hergestellten Zierkiese und physikalische Eigenschaften

Fig. 13: Appearance of the decorative gravels produced according to test sequence A and the physical properties

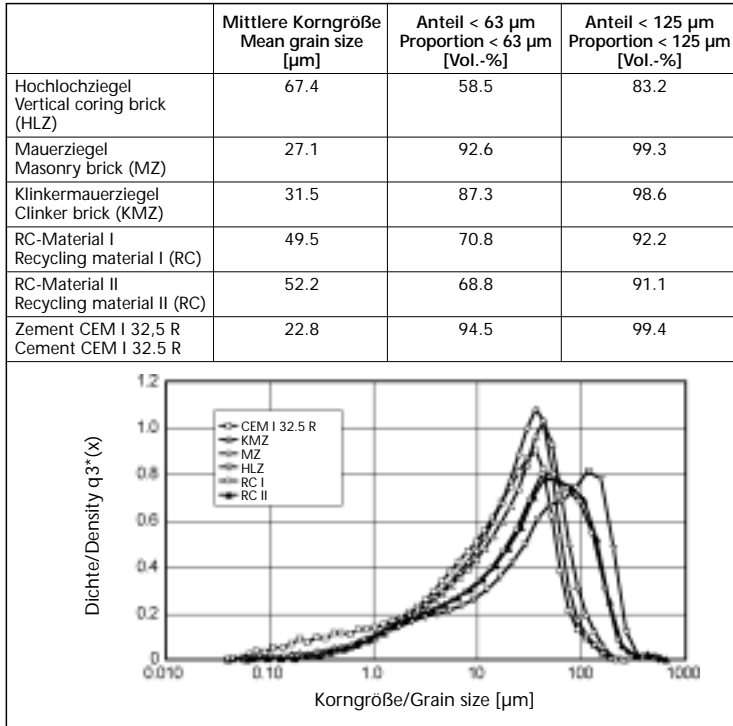


Bild 14: Charakteristische granulometrische Kennwerte und Verteilungsdichtekennlinien der getrennt gemahlene Mineralmehle aus Ziegeln bzw. Mauerwerkbruch und des Zements
Fig. 14: Characteristic granulometric values and distribution density curves of the separately ground powders from brick and masonry rubble respectively, and of the cement

mörtelprismen, deren Zusammensetzung der DIN EN 196 Teil 1 entsprach, zur Ermittlung der Festigkeit hergestellt. In Bild 14 sind charakteristische granulometrische Kennwerte und die Verteilungsdichtekurven der Mineralmehle angegeben. Daraus geht hervor, dass die Feinheit in der Reihenfolge Hochlochziegelmehle – Recycling-(RC-)Mehle – Mehle aus Mauerziegel bzw. Klinkermauerziegel zunimmt. Aber selbst die feinsten Ziegelmehle sind noch gröber als der eingesetzte Zement. Die Festigkeiten der Mörtel mit Mineralmehlen aus Klinkermauerziegel bzw. Mauerziegel sowie RC-Materialien bewegen sich bis zum 28. Tag in dem für die Inertstoffzugabe berechneten Bereich (Bild 15). Erst nach längerer Erhärtung wird ein Festigkeitszuwachs erreicht. Mörtel mit Hochlochziegelmehlen liegen zu allen Prüfterminen über der Inertstoffkurve. Nach 90 Tagen werden Festigkeiten erreicht, die nur noch 5 % unter dem Referenzwert liegen. Dieser Festigkeitsanstieg nach längerer Reaktionsdauer lässt den Schluss zu, dass sich besonders Mehle aus niedrig gebrannten Ziegeln aktiv an der Festigkeitsbildung beteiligen. Die Laboruntersuchungen wurden durch kleintechnische Untersuchungen mit systematisch abgestuften Feinheiten der Mineralmehle ergänzt. Für diese Untersuchungen wurden Sande aus Mauerwerkbruch eingesetzt, die von einem Recyclingunternehmen bereitgestellt worden waren. Für die Mahlung kam die Kugelmahl-Sicht-Anlage zum Einsatz, die im Technikum des Lehrstuhls Aufbereitung von Baustoffen und Wiederverwertung an der Bauhaus-Universität Weimar betrieben wird. Die Anlage ist in [57] beschrieben, die Vorgehensweise bei der kleintechnischen Mahlung der Sande aus Mauerwerkbruch kann [23] entnommen werden. Es wurden Mineralmehle erzeugt, aus denen analog zu den Laboruntersuchungen Mischbindemittel hergestellt wurden. Die Mörtel-

tional constituents not originating from the cement are included in the hydration reactions. Thus the deficit resulting from the “dilution” of the cement is partly compensated. In contrast to the hydraulic reaction, however, the pozzolanic reaction takes place slowly and makes appreciable contributions to the strength only from a hardening duration of 28 days.

An important influencing factor for pozzolanicity is the content of pozzolanic active constituents in the powders. In powdered brick these are reactive silicic acid and reaction-capable Al_2O_3 compounds which react with the $Ca(OH)_2$ in the case of sufficient fineness. However an expressive cumulative parameter for the pozzolanicity from chemical and granulometric characteristic values cannot be given so far. The assessment of pozzolanicity is therefore based mainly on strength measurements.

Continuing earlier investigations, tests were to be carried out on mineral powders produced from unused bricks and masonry rubble to establish the contribution of these powders caused by the pozzolanicity to the strength formation of mortars [19]. The powders were ground in a batch ball mill and mixed with Portland cement in the ratio of 1 : 5. From the mixtures standard mortar prisms, of which the composition corresponded to DIN EN 196, Part 1, were produced in order to determine the strength.

Figure 14 shows characteristic granulometric values and the distribution density curves of the mineral powders. From this it can be seen that the fineness increases in the order: powdered vertical coring brick – recycling (RC) powders – powders from masonry brick or clinker brick. But even the finest brick powders are still coarser than the cement used. The strengths of the mortar with mineral powders from clinker bricks or masonry bricks lie up to the 28th day in the range calculated for the addition of inert substances (Figure 15). Only after a longer hardening period is an increase in strength achieved. Mortars with powdered vertical coring brick lie above the inert material curve at all testing times. After 90 days strengths are achieved, which lie only 5% below the reference value. This rise in strength after a longer reaction period leads to the conclusion that in particular powders from low fired bricks take an active part in strength formation.

The laboratory investigations were supplemented by small-scale technical experiments with systematically graduated finenesses of the mineral powders. For these investigations sands from masonry rubble were used, which were provided by a recycling company. The ball mill – screening plant, which is operated in the Technical Centre of the Chair of Building Materials Preparation and Recycling at the Bauhaus University of Weimar, was used for the grinding process. The plant is described in [57], the method of procedure for the small-scale grinding of the sands from masonry rubble can be taken from [23]. Mineral powders were produced, from which – similar to the laboratory experiments – mixed binding agents were made. The mortar strengths of these mixed binding agents are shown in Figure 16 as a function of the mean grain size of the powders.

According to Figure 16 the recycling powders also take part in the strength formation. The powder which is finer than the cement provides a significant strength contribution already after 28 days. The mixed binding agents which contain the coarsest powder lie in the range of the inert material admixture, both for the 28 days' strength and for the strength achieved after 90 days.

festigkeiten dieser Mischbindemittel sind im Bild 16 in Abhängigkeit von der mittleren Korngröße der Mehle dargestellt. Nach Bild 16 beteiligen sich auch die Recyclingmehle an der Festigkeitsbildung. Das Mehl, das feiner als der Zement ist, liefert einen deutlichen Festigkeitsbetrag bereits nach 28 Tagen. Die Mischbindemittel, die das größte Mehl enthalten, bewegen sich sowohl für die 28-Tage-Festigkeit als auch für die Festigkeit, die nach 90 Tagen erzielt wird, im Bereich der Inertstoffzugabe.

Blähgranulate aus Mauerwerkbruch

Ausgangspunkt für diese Entwicklung war ein Forschungsprojekt, in dem Technologien zur gemeinsamen Verwertung von Porenbeton und Mauerwerkbruch untersucht wurden [58, 59, 60, 61, 62]. Ziel der Entwicklung waren Rezepturen und Technologien zum Herstellen geblähter Granulate, die als Leichtzuschlag für Beton oder in konstruktiven Leichtschüttungen eingesetzt werden können. Die Auswahl der Ausgangsstoffe erfolgte hauptsächlich aus der Sicht des Baustoffrecyclings – für diese Materialien bestehen Defizite hinsichtlich der Verwertungsquote und des Verwertungs-niveaus. Nach mehreren Versuchen mit unbefriedigenden Ergebnissen wurde folgendes erkannt: Aufgemahlener Mauerwerkbruch allein oder gemischt mit Porenbetonmehl eignet sich gut für die Granulatherstellung.

Der technologische Ablauf der Untersuchungen ist im Bild 17 dargestellt. Die Ausgangsmaterialien Mauerwerkbruch und Porenbetonabfälle wurden zunächst getrennt auf Korngrößen < 100 µm aufgemahlen und dann gemischt. Der Anteil des Mauerwerkmehs im Gemisch kann bis zu 100 % betragen, während der Anteil an Porenbetonmehl 30 % nicht übersteigen sollte. An das Aufmahlen schlossen sich das Mischen der Komponenten unter Zugabe des Blähmittels – geeignet waren z. B. SiC-Rückstände – und das Granulieren an. In dem nachfolgenden thermischen Prozess wurde das Granulat aufgebläht und verfestigt.

In den Untersuchungen wurde Mischbrechsand von einer stationären Recyclinganlage verwendet, der erhebliche Schwankungsbreiten hinsichtlich der stofflichen Zusammensetzung aufweisen kann (siehe Teil 1: Bild 4). Um trotzdem ein Produkt mit ausgeglichenen und definierten Eigenschaften zu erzeugen, kommen der Mahlung und dem thermischen Prozess besondere Bedeutung zu. Durch die Mahlung können zwei wichtige technologische Effekte erreicht werden:

- ▶ Die Homogenität wird verbessert. Die Granaliengröße enthält eine für die Gesamtzusammensetzung repräsentative Anzahl der unterschiedlichen, im Gemisch vorliegenden Baustoffpartikel und nimmt mit sinkender Partikelgröße ab. Nach Abschätzungen auf der Basis von [63] ist bei 0,1-mm-Partikeln eine Granaliengröße von etwa 5 mm erforderlich, während bei 1-mm-Partikeln erst 50 mm große Granalien in ihrer mittleren Zusammensetzung der Grundgesamtheit entsprechen
- ▶ Die Agglomerierfähigkeit wird so weit verbessert, dass stabile Grüngranalien ohne Zugabe von Bindemitteln auf dem Granulierteller erzeugt werden können.

Der thermische Prozess und die Prozessart, der Gehalt sowie die Feinheit des Blähmittels sind ausschlaggebend für die Umwandlung der Grüngranulate in Blähgranulate mit definierten Eigenschaften. Bei der thermischen Behandlung ist eine ausreichende Gasbildung durch das Blähmittel in einem Temperaturbereich, in dem bereits ausreichende Mengen an Schmelzphasen vorhanden sind, notwendige Voraussetzung

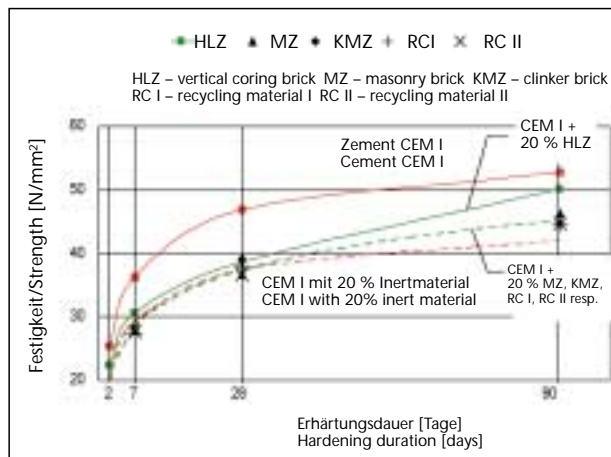


Bild 15: Druckfestigkeitsentwicklung für Bindemittel mit Ziegel-mehlen bzw. Recyclingmehlen im Vergleich zum Referenzzement bzw. zur berechneten Inertstoffzugabe

Fig. 15: Development of compressive strength for binding agents with powdered brick or recycling powders in comparison to reference cement or to the calculated inert material admixture

Expanded granulates from masonry rubble

The point of departure for this development was a research project, in which technologies for the joint utilization of aerated concrete and masonry rubble were examined [58, 59, 60, 61, 62]. The aim of the development was to achieve recipes and technologies for the production of expanded granulates, which can be used as lightweight aggregates for concrete or in structural lightweight fill applications. The selection of the starting material took place mainly from the point of view of construction material recycling – for these materials there are deficits in regard to the utilization quota and utilization level. After several tests with unsatisfactory results, the following was recognized: Ground masonry rubble alone or mixed with powdered aerated concrete is well suited for the production of granulates.

The technological sequence of the investigations is shown in Figure 17. The starting materials, masonry rubble and aerated

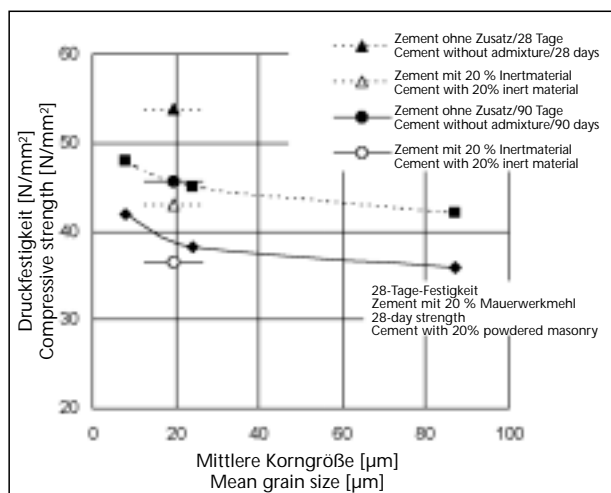


Bild 16: Abhängigkeit der Druckfestigkeiten der Mörtel nach 28 bzw. 90 Tagen von der mittleren Korngröße der Mineralmehle
Fig. 16: Compressive strengths of the mortar after 28 and 90 days as a function of the mean grain size of the mineral powders

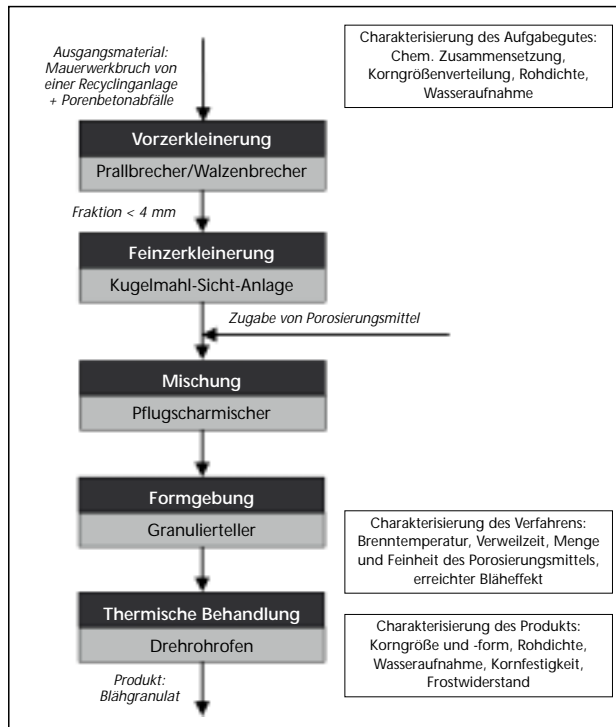


Bild 17: Versuchsablauf der Blähgranulatherstellung im Technikumsmaßstab

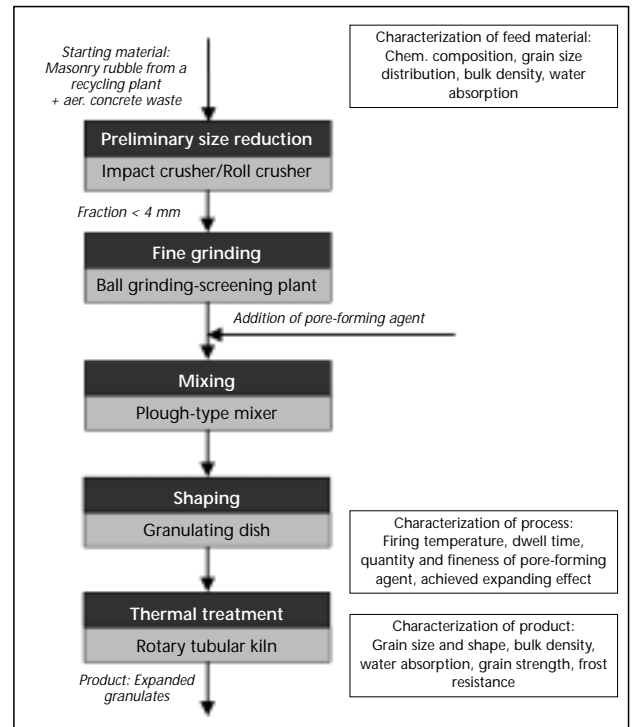


Fig. 17: Test sequence for the production of expanded granulates on technical college scale

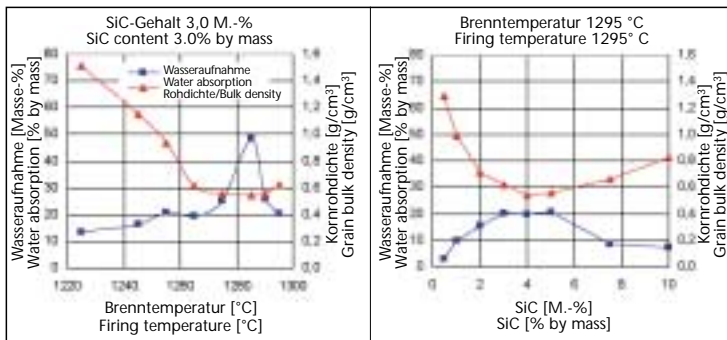


Bild 18: Einfluss der Brenntemperatur und der Zugabemenge an SiC auf die Kornrohddichte und die Wasseraufnahme der erzeugten Granulate

Fig. 18: Influence of the firing temperature and admixture quantity of SiC on the grain bulk density and the water absorption of the finished granulates

für die Erzeugung poröser Granulate. Gleichzeitig ist das Kollabieren der Granalien auf Grund zu hoher Schmelzphasenanteile zu vermeiden. Bild 18 verdeutlicht diese Zusammenhänge:



Bild 19: Ausbildung der Poren in Granulaten auf der Basis von Mauerwerkabbruch und Porenbeton

Fig. 19: Formation of the pores in granulates on the basis of masonry rubble and aerated concrete

concrete waste, were first ground separately to grain sizes $< 100\ \mu\text{m}$ and then mixed. The proportion of masonry rubble in the mixture can amount to up to 100%, while the proportion of powdered aerated concrete should not exceed 30%. After the grinding, mixing of the components took place with the addition of the expanding agent – e.g. SiC residues were suitable – and then the granulating process. In the subsequent thermal process the granulates were expanded and solidified. In the investigations mixed crushed sand from a stationary recycling plant was used, which can show substantial fluctuation ranges in regard to the material composition (see Part 1). In order nevertheless to produce a product with balanced and defined properties, special significance is attached to grinding and to the thermal process. Through the grinding process two important technological effects can be achieved:

- The homogeneity is improved. The granule size contains a number, representative for the total composition, of the different building material particles present in the mixture and declines as the particle size decreases. According to estimates on the basis of [63], a granule size of about 5 mm is necessary for 0.1 mm particles, whereas for 1 mm particles only 50 mm large granules correspond in their average composition to the basic entirety.
- The agglomerating capability is improved insofar that stable green granules can be produced on the granulating dish without addition of binding agents.

The thermal process and the process type, the content and the fineness of the expanding agent are decisive for the transformation of the green granulates into expanded granulates with defined properties. In the thermal treatment, a sufficient formation of gas by the expanding agent in a temperature range, in which already sufficient quantities of melt phases are present, is a necessary prerequisite for the production of porous granulates. At the same time the collapse of the granules due to too high proportions of melt phases must be avoided. Figure 18 illustrates these relationships:

- Das linke Diagramm weist aus, dass der einzuhaltende Temperaturbereich zwischen 1 260 und 1 290 °C liegt. Bei zu geringen Brenntemperaturen (< 1 260 °C) findet keine vollständige Zersetzung des SiC statt und die sich bildende Menge an Schmelzphase ist nicht ausreichend. Bei zu hohen Temperaturen schrumpfen die Granalien. Die Rohdichte steigt wieder an, die Wasseraufnahme geht zurück
- In Bezug auf Menge und Feinheit des Porosierungsmittels gibt es ebenfalls ein Optimum. Bei geringen Zusatzmengen oder im Vergleich zum Matrixmaterial größerer Korngröße des Porosierungsmittels werden dichte Granalien mit hoher Rohdichte erzeugt. Bei höheren Zusatzmengen und feinerer Aufbereitung nimmt die Porenbildung zu, woraus eine geringere Rohdichte resultiert. Bei einer weiteren Erhöhung der Zugabemenge kollabieren die Granalien. Die Rohdichte steigt wieder an. Die Wasseraufnahme verhält sich umgekehrt proportional zur Rohdichte.

Im Bild 19 ist die Herausbildung polyedrischer Poren in Granalien mit unterschiedlichen Blähmitteldosierungen dargestellt. Die Korngrößenzunahme durch den Blähvorgang liegt für das Granulat mit der Rohdichte von 0,62 g/cm³ in der Größenordnung von 50% bezogen auf die Korngröße der Rohgranulate.

Die erzeugten Granulate besitzen sehr gute bautechnische Eigenschaften und können durch die Dosierung des Porosierungsmittels an die gestellten Aufgaben angepasst werden. Die Kornrohden liegen zwischen 0,5 und 1,8 g/cm³, die Wasseraufnahmen zwischen 2,3 und 15 Masse-%. Weitere Baustoffkenngrößen, die an einer größeren, kleintechnisch hergestellten Granulatcharge nach DIN EN 1097, DIN 4226-3 und DIN 52104-N ermittelt wurden, sind in der Tabelle 7 den Eigenschaften eines Blähtons gegenübergestellt. Diese Ergebnisse belegen ebenso wie die Betonwarenherstellung in einem Betonwerk, dass die hier vorgestellten mineralischen Leichtzuschläge aus Mauerwerkbruch in ihren Eigenschaften den auf dem Markt eingeführten Produkten wie Blähton ebenbürtig sind.

Mit der Leichtgranulatherstellung aus Mauerwerkbruch wurde nachgewiesen, dass sich dieses Material für ein rohstoffliches Recycling eignet und dass die Heterogenität beherrschbar ist. Bei einer Gegenüberstellung mit Ton als traditionellem keramischem Rohstoff wird Folgendes deutlich:

- Die typischen Eigenschaften von Tonen wie Plastizität und Bildsamkeit sind im Mauerwerkbruch nicht mehr vorhanden. Bei der Formgebung kann deshalb nicht auf diese Eigenschaften zurückgegriffen werden. Stattdessen bietet sich die Granulation an, bei der Oberflächenkräfte zwischen den Partikeln des aufgemahlten Mauerwerkbruchs zur Erzeugung formstabiler Granulate genutzt werden.
- Im Unterschied dazu haben die Eigenschaften wie das Sinter- und Schmelzverhalten sowohl den Primärprozess der Ziegelherstellung als auch den Prozess der Nutzung reversibel überlebt. Auf diese Eigenschaften kann ein zweites Mal zurückgegriffen werden. Auf ihnen beruht die Verfestigung der Granalien.

Weitere Unterschiede bestehen darin, dass der Rohstoff Mauerwerkbruch kein chemisch gebundenes Wasser enthält, was aus energetischer Sicht von Vorteil ist. Blähfähige Stoffe sind ebenfalls nicht vorhanden und müssen deshalb im technologischen Ablauf zugefügt werden.

Mauerwerkbruch kann also als Rohstoff in solchen Technologien eingesetzt werden, die auf die reversiblen Eigenschaften zurückgreifen. Technologien, die zusätzlich auf irreversiblen Merkmalen aufbauen, können nicht ein zweites Mal realisiert

- The diagram on the left shows that the temperature range to be maintained lies between 1 260 and 1 290 °C. If the firing temperatures are too low (< 1 260 °C), a complete decomposition of the SiC does not take place and the quantity of melt phase which forms is not sufficient. If the temperatures are too high, the granules shrink. The bulk density increases again, the water absorption declines.
- In regard to quantity and fineness of the pore-forming agent, there is also an optimum. With small admixture quantities or, in comparison to the matrix material, a coarser grain size of the pore-forming agent, dense granules with high bulk density are produced. With higher admixture quantities and finer preparation the pore formation increases, resulting in a lower bulk density. With a further increase of the admixture quantity the granules collapse. The bulk density increases again. The behaviour of the water absorption is inversely proportional to the bulk density.

Figure 19 shows the formation of polyhedral pores in granules with different dosages of the expanding agent. The grain size increase due to the expanding process for the granulates with the bulk density of 0.62 g/cm³ lies in the order of 50%, referred to the grain size of the raw granulates.

The finished granulates have very good structural engineering properties and can be adapted to the required functions by dosing of the pore-forming agent. The grain bulk densities lie between 0.5 and 1.8 g/cm³, the water absorption between 2.3 and 15% by mass. Further building material parameters, which were determined on a larger batch of granulates produced on a small scale according to DIN EN 1097, DIN 4226-3 and DIN 52104-N, are compared in Table 7 with the properties of an expanded clay. These results, like the production of concrete ware in a concrete works, demonstrate that the lightweight mineral aggregates from masonry rubble presented here are equivalent in their properties to the products introduced on the market such as expanded clay. With the production of light granulates from masonry rubble, it has been proved that this material is suitable for raw material recycling and that the heterogeneity is controllable. In a com-

Tabelle 7: Parameter der Granulate
Table 7: Parameters of the granulates

Parameter der Granulate aus Ziegel- und Porenbetonmehl Parameter of the granulates of brick powder and aerated concrete powder	Leichtgranulat Light granulates	Blähton Expanded clay
Brenntemperatur [°C] Firing temperature	1250	1150
Kornrohden [kg/m ³] Grain bulk density	780	700
Schüttdichte [kg/m ³] Apparent density	540	330
Wasseraufnahme [Masse-%] Water absorption [% by mass]	14	27
Frostbeständigkeit [Masse-%] Frost resistance [% by mass]	0,03	nicht bestimmt not determined
Kornfestigkeit [kN] Grain strength	12,72	nicht bestimmt not determined
Raumbeständigkeit [Masse-%] Volume stability [% by mass]	0,33	nicht bestimmt not determined

werden. Mauerwerkbruch eignet sich also durchaus an Stelle von Ton als Rohstoff für die Herstellung von Leichtzuschlägen.


Zusammenfassung

Recyclingbaustoffe aus Ziegelrestmassen oder Mauerwerkbruch können nach der DIN 4226 klassifiziert werden. Die darin aufgeführten Typen rezyklierter Gesteinskörnungen unterscheiden sich hauptsächlich in ihren Gehalten an Ziegeln, was unterschiedliche Verwertungsmöglichkeiten zur Folge hat:

- ▶ Reine Ziegelsplitt, die als Produktionsabfälle anfallen: Dieses Material eignet sich als Zuschlag für Leichtbetone
- ▶ Mauerwerksplitt und -sande, die überwiegend aus gebrauchten Ziegeln bestehen: Dieses Material ist für Dachbegrünungen oder in anderen vegetationstechnischen Anwendungen einsetzbar.
- ▶ Mischsplitt und -sande: Ihr Einsatz ist auf Aufgaben im Erd- und Landschaftsbau beschränkt.

Verwertungsdefizite bestehen vor allem für die feinen Fraktionen, die bei der Aufbereitung von Mauerwerk zu definierten Körnungen entstehen, und für die gemischten Splitt, die eine beträchtliche Heterogenität aufweisen. In eigenen Entwicklungsarbeiten wurde nachgewiesen, dass daraus reaktive Mehle zum Einsatz in Zementen und Betonen oder Leichtgranulate, die analog zu Blähtonen eingesetzt werden können, herstellbar sind. In beiden Fällen ist in den dafür entwickelten technologischen Abläufen eine Mahlung integriert, durch die eine Verbesserung der Homogenität erreicht wird und weitere Stoffeigenschaften der Nutzung zugänglich gemacht werden. Eine Verwertungstechnologie, welche die attraktive Farbe und Struktur von Abbruchziegeln nutzt, ist die Herstellung von Zierkies. In Labor- und Feldversuchen wurde die Frostbeständigkeit dieses Kieses nachgewiesen und seine Eignung für die dekorative Gartengestaltung anschaulich belegt.

Literatur

- [56] Borchardt, K.: Kornformveränderungen von Ziegelsplitt durch Behandlung in der Schwingmühle. Diplomarbeit, Bauhaus-Universität Weimar, Fakultät Bauingenieurwesen, Professur Aufbereitung von Baustoffen und Wiederverwertung, 2000.
- [57] Wienke, L.; Lander, S.; Stark, U.; Müller, A.: Untersuchungen zur Mahlung von Rohstoffen, Abfällen und Zwischenprodukten in einer kleintechnischen Anlage. ZKG 55 (2002) 8, S. 39–48.
- [58] Reinhold, M.; Müller, A.: Leichtzuschläge aus Feinstoffen des Mauerwerksabbruchs. Vortrag zur Recycling '01, Bauhaus-Universität Weimar, Fakultät Bauingenieurwesen, Professur Aufbereitung von Baustoffen und Wiederverwertung, 12. Oktober, 2001.
- [59] Mueller, A.; Reinhold, M.: Lightweight Aggregate Produced From Fine Fractions Of Construction and Demolition Waste. R'02 World Congress on Integrated Resources Management, Vortrag am 14. Februar, Genf, 2002.
- [60] Reinhold, M.: The measurement of important granulometric characteristics of aggregates on the basis of photo-optical image analysis systems. Challenges of concrete construction, University of Dundee, 5–11 September 2002.
- [61] Reinhold, M.: Leichtgranulate aus Mauerwerkbruch. Vortrag Tagung „10 Jahre UVR-FIA-GmbH“, Aufbereitung und Recycling, Freiberg, 13. u. 14. November 2002.
- [62] Reinhold, M.; Müller, A.: Patentanmeldung „Poröse Granulate aus Bauabfällen“ gemeinsam mit dem VTI Saalfeld am 10.12.2002.
- [63] Stieß, M.: Mechanische Verfahrenstechnik 1. 2. Auflage. Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1995. 

parison with clay as traditional ceramic raw material, the following becomes apparent:

- ▶ The typical properties of clays such as plasticity and ductility are no longer present in masonry rubble. In the shaping process, therefore, one cannot fall back on these properties. Instead granulation is a possibility, in which surface forces between the particles of the ground masonry rubble are used to produce dimensionally stable granulates.
- ▶ In contrast, the properties such as the sintering and melting behaviour have reversibly survived both the primary process of brick manufacture and the process of use. These properties can be called upon for a second time. The solidification of the granules is based on them.

Further differences consist in the fact that the raw material masonry rubble contains no chemically bonded water, which is an advantage from the point of view of energy. Expandable substances are also not present and must therefore be added in the technological process.

Masonry rubble can therefore be used as a raw material in such technologies which fall back on the reversible properties. Technologies which rely additionally on irreversible characteristics cannot be realized for a second time. Masonry rubble is therefore absolutely suitable in place of clay as a raw material for the production of lightweight aggregates.

Summary

Recycling construction materials from brick residue masses or masonry rubble can be classified according to DIN 4226. The types of recycled rock grains listed in it differ mainly in their content of brick, which leads to different utilisation possibilities:

- ▶ Pure brick chippings which occur as production waste: This material is suitable as an aggregate for lightweight concrete.
- ▶ Masonry chippings and sands consisting mainly of used bricks: This material can be used for green roof planting or in other vegetation applications.
- ▶ Mixed chippings and sands: Their use is limited to earthwork and landscaping functions.

Utilization deficits exist above all for the fine fractions, which occur in the preparation of masonry into defined grain sizes, and for the mixed chippings which have a considerable heterogeneity. In own development works it was demonstrated that from these it is possible to produce reactive powders for use in cements and concretes, or lightweight granulates which can be used in the same way as expanded clays. In both cases a grinding process is integrated in the technological sequences developed for this purpose, as a result of which an improvement of the homogeneity is achieved and further material properties are made accessible for use.

A recycling technology which makes use of the attractive colour and structure of demolition bricks is the production of decorative gravel. The frost resistance of this gravel has been demonstrated in laboratory and field tests, which also illustrate its suitability for decorative garden design.

Literature

See German text. 