

Progress in the recycling of masonry rubble (Part 2)

Fortschritte beim Recycling von Mauerwerkbruch (Teil 2)

Present practice in the recycling of masonry rubble cannot claim to be contributing to resource efficiency. Building on a 2003 review article on the recycling of masonry rubble [5], this contribution reports on new findings and current developments of relevance. The characteristics of "masonry rubble" as a material flow category are described, and current research findings and extant technologies explained.

Das Recycling von Mauerwerkbruch, so wie es heute betrieben wird, kann den Anspruch, zur Ressourceneffizienz beizutragen, nicht erfüllen. Aufbauend auf dem 2003 erschienenen Übersichtsartikel zum Recycling von Mauerwerkbruch [5], wird über neue Erkenntnisse und aktuelle Entwicklungen berichtet. Angaben zu den Merkmalen des Stoffstroms „Mauerwerkbruch“ werden gemacht sowie aktuelle Forschungsergebnisse und technische Lösungen dargestellt.

4 Use of brick and masonry rubble as raw material

The term material salvaging, or feedstock recycling, describes the use of recycled material in a transmutating process. In the present context, the chemical composition and reactivity of the material are of key importance, while material properties considered to be important for the aforementioned utilization methods fade into the background. Superfine and fine-grained starting materials can be processed. With sole respect to such construction material production processes as brickmaking or cement production, brick and masonry rubble can be salvaged for inclusion.

The use of pure brick rubble or masonry rubble as raw material for brick manufacturing has been investigated in a number of instances. In one Dutch study, it was shown that mixtures containing approximately equal shares of clay and recycled sand can be used to produce bricks of adequate quality [23]. Recent scientific studies on the use of construction waste consisting of brick, concrete and mortar as raw material components for brick manufacturing confirm that assertion [24]. In one case, up to 50 mass % construction and demolition waste was used in a factory mix. Replacement of up to 20 mass % had no effect on product properties. Substituting higher percentages, however, can, as the case may be, necessitate adjustment of the firing temperature.

Practice-oriented studies on the use of construction waste in brick manufacturing were performed in projects conducted by Wienerberger AG [25]. The practicable specific addition was seen to be dependent on the plasticity of the respective clay. As in the aforementioned findings, a share of 20 mass % still had no negative impact on product quality. Westerwald clay and other highly plastic clays were able to accommodate up to 60% finely ground filler and still produce high-quality products exhibiting low porosity. A criterion was formulated, according to which the added material must be ground to particle sizes < 125 µm. In that case, possible inputs of calcite from mortar or concrete have no consequences for the product's quality characteristics.

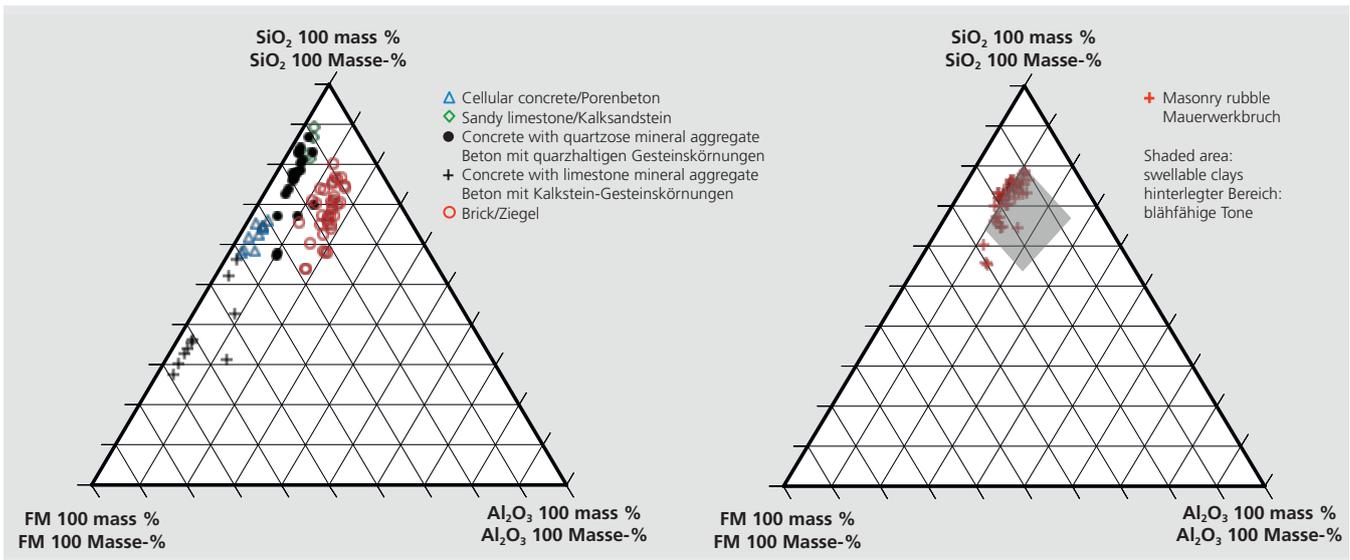
A Belgian company is marketing a product called "Cerafill" that is made of the "red" fraction of construction waste and

4 Verwertung von Ziegel- und Mauerwerkbruch als Rohstoff

Unter rohstofflicher Verwertung kann der Einsatz eines Recyclingmaterials in einem stoffumwandelnden Prozess verstanden werden. In diesem Fall nehmen die chemische Zusammensetzung und die Reaktivität eine Schlüsselstellung ein. Werkstoffliche Eigenschaften, die bei den o.g. Verwertungswegen wichtig sind, rücken in den Hintergrund. Mehlfeine oder feinkörnige Ausgangsstoffe können verarbeitet werden. Werden nur Prozesse der Baustoffherstellung betrachtet, ist eine rohstoffliche Verwertung von Ziegel- und/oder Mauerwerkbruch bei der Ziegel- oder Zementherstellung denkbar.

Der Einsatz von sortenreinem Ziegelbruch oder Mauerwerkbruch als Rohstoff für die Ziegelherstellung wurde mehrfach untersucht. In einer niederländischen Arbeit wurde nachgewiesen, dass aus Mischungen, die Ton und Recyclingsande in etwa gleichen Anteilen enthielten, Ziegel mit ausreichender Qualität hergestellt werden können [23]. Neuere wissenschaftliche Untersuchungen zur Verwendung von Bauabfällen, bestehend aus Ziegel, Beton und Mörtel, als Rohstoffkomponente bei der Ziegelherstellung bestätigen diese Aussage [24]. In einer Werkmischung wurden bis zu 50 Masse-% durch Bauabfall ersetzt. Ein Austausch bis zu einer Menge von 20 Masse-% blieb ohne Auswirkungen auf die Eigenschaften. Werden höhere Mengen substituiert, ist ggf. eine Anpassung der Brenntemperatur erforderlich.

Praxisorientierte Untersuchungen zum Einsatz von Bauabfällen bei der Ziegelherstellung wurden in Projekten der Wienerberger AG durchgeführt [25]. Die mögliche Zugabemenge war von der Plastizität des jeweiligen Tones abhängig. Übereinstimmend mit den o.g. Ergebnissen war ein Anteil von 20 Masse-% ohne Verschlechterung der Produktqualität möglich. Sehr plastische Tone wie beispielsweise Westerwälder Tone konnten bis zu 60 % des fein gemahlten Füllers aufnehmen. Trotzdem waren qualitativ hochwertige Produkte mit geringer Porosität herstellbar. Als Anforderung wurde formuliert, dass das zugegebene Material in Partikelgrößen < 125 µm vorliegen muss. Dadurch bleibt der mögliche Eintrag von Calcit aus Mörteln oder Betonen ohne Folgen für die Produkteigenschaften.



- »7 Locations of unblended major components of masonry and of real masonry rubble in the ternary system SiO_2 - Al_2O_3 - fluxing agent FM
 »7 Lage der unvermischten Hauptbestandteile von Mauerwerk und von realem Mauerwerkbruch im Dreistoffsystem SiO_2 - Al_2O_3 - Flussmittel FM

which can serve as raw material for heavy clay products. The material has a particle size of $< 150 \mu\text{m}$ and must satisfy the following chemical criteria: $\text{LoI} < 3 \text{ mass } \%$, total sulphur content $< 0.5 \text{ mass } \%$, CaCO_3 content $< 10 \text{ mass } \%$. Studies dealing with the use of such materials for manufacturing clay-based building ceramics were included in the findings described in [25].

A further option is to use masonry rubble as a source of alumina for cement production. Extensive laboratory experimentation with waste material from the production of red and white wall tiles showed that the clay component can be completely replaced with ceramic waste, if the waste is reduced in size to particles measuring $< 90 \mu\text{m}$ [26, 27]. The properties of the resultant cement clinkers are comparable to those of products made of conventional raw materials. Wall-tile glaze produced elevated ZrO_2 , ZnO and B_2O_3 contents. The hardening of clinkers appeared to remain unaffected.

At one cement factory in Austria, yearly quantities of some 100 000 t of brick rubble in the particle size range 0/80 mm are blended with clay for use as raw material in the production of cement clinker [28]. The material must satisfy the following criteria: It should contain little or no concrete, mortar or natural mineral aggregate. Iron, wood and other interferants must be removed in advance. Chemically, chlorine and TOC are considered undesirable.

The production of lightweight aggregate [29, 30] is a potential solution for the recycling of unsorted masonry rubble and for sand fractions from such rubble. Such lightweight (mineral) aggregate is generated in a thermal process much like that used for expanded clay and expanded shale. In the light of earlier findings, the production conditions, the various steps and techniques of production and the properties of the resultant lightweight mineral aggregates were investigated in detail.

Initially, in order to analyse and appraise the fundamental suitability of masonry rubble for use as raw material, recourse was taken to the ternary system SiO_2 - Al_2O_3 - fluxing agent ($\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + \text{MgO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$), which can be used for evaluating heavy clay starting materials (»7). With regard to the pure constituents of masonry rubble, the mineral-bonded materials sandy limestone, cellular concrete and concrete are all

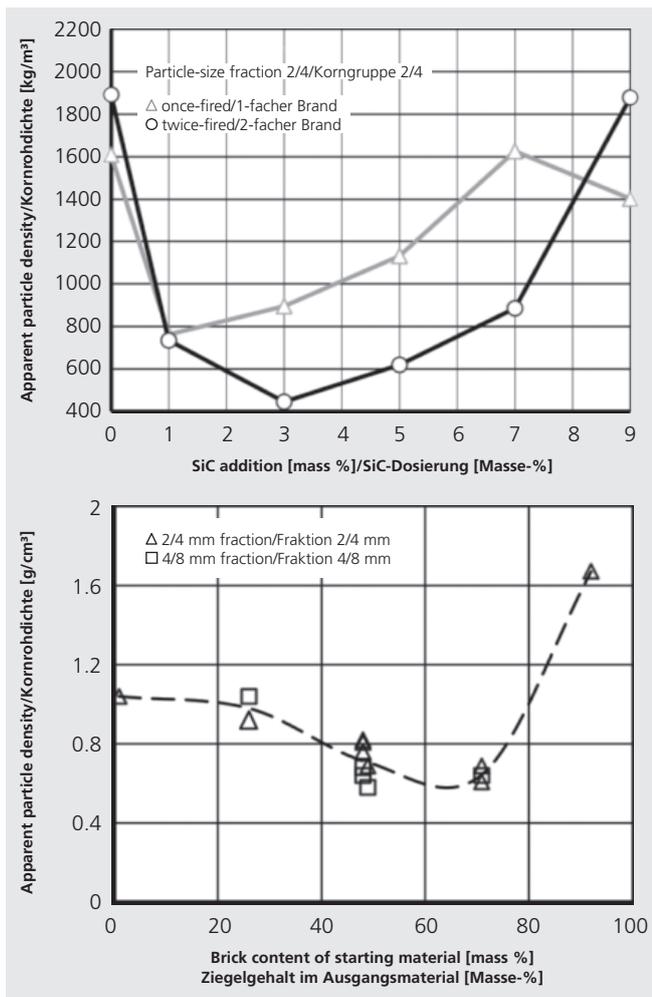
Unter der Bezeichnung „Cerafill“ wird von einer belgischen Firma ein Produkt angeboten, das aus der „roten“ Fraktion von Bauabfällen hergestellt wird und als Rohstoff für die Ziegelproduktion eingesetzt werden kann. Das Material hat eine Partikelgröße $< 150 \mu\text{m}$ und muss folgenden chemischen Anforderungen genügen: Glühverlust $< 3 \text{ Masse-}\%$, Gesamtschwefelgehalt $< 0,5 \text{ Masse-}\%$, CaCO_3 -Gehalt $< 10 \text{ Masse-}\%$. Untersuchungen zur Verwendung dieses Materials für die Ziegelherstellung wurden durchgeführt und flossen in die in [25] dargestellten Ergebnisse ein.

Als weitere Variante kann Mauerwerkbruch als Aluminiumoxidträger bei der Zementherstellung eingesetzt werden. Ausführliche Laboruntersuchungen mit Produktionsabfällen von roten und weißen Wandfliesen zeigten, dass die Tonkomponente vollständig durch die keramischen Abfälle ersetzt werden kann, wenn die Abfälle auf Partikelgrößen $< 90 \mu\text{m}$ gemahlen werden [26, 27]. Die Eigenschaften der erzeugten Zementklinker sind den Merkmalen von aus konventionellen Rohstoffen erzeugten Produkten vergleichbar. Die Glasuren der Wandfliesen führten zu höheren ZrO_2 -, ZnO - und B_2O_3 -Gehalten. Auswirkungen auf die Erhärtung der zu Zementen vermahlenden Klinker wurden nicht festgestellt.

In einem Zementwerk in Österreich wird jährlich eine Menge von ca. 100 000 t Ziegelbruch der Körnung 0/80 mm zusammen mit Ton rohstofflich für die Herstellung von Zementklinker verwertet [28]. Das Material muss folgenden Anforderungen genügen: Es sollte kein oder möglichst wenig Beton, Mörtel oder natürliche Gesteinskörnungen enthalten. Störstoffe wie Eisen oder Holz müssen vorher entfernt werden. Aus chemischer Sicht sind Chlor und TOC unerwünscht.

Eine Verwertungslösung mit Potenzial sowohl für unsortierten Mauerwerkbruch als auch für die Sandfraktionen von Mauerwerkbruch ist die Herstellung von Aufbaukörnungen [29, 30]. Darunter werden leichte Gesteinskörnungen verstanden, die ähnlich wie Blähton und Blähschiefer in einem thermischen Prozess erzeugt werden. Anknüpfend an frühere Ergebnisse wurden die Herstellungsbedingungen, die Verfahrensschritte und die dafür geeigneten Techniken sowie die Eigenschaften der erzeugten leichten Gesteinskörnungen ausführlich untersucht.

Um zunächst die grundsätzliche Eignung von Mauerwerkbruch als Rohstoff zu überprüfen, wurde das Dreistoffsystem



»8 Effects of SiC injection on the apparent specific density of expanded aggregate composed of masonry rubble with 48 mass % brick, fired at 1180 °C (left); and effects of brick content of starting material on apparent specific density of expanded aggregate based on masonry rubble; fabrication conditions: addition of 1 or 3 mass % SiC, fired at 1165–1180°C (right)

»8 Einfluss der SiC-Dosierung auf die Rohdichte von Blähgranulaten aus Mauerwerkbruch mit 48 Masse-% Ziegel bei einer Brenntemperatur von 1180°C (links) und Einfluss des Ziegelgehaltes im Ausgangsmaterial auf die Rohdichte der Blähgranulate aus Mauerwerkbruch, Herstellungsbedingungen: Zugabe von 1 bzw. 3 Masse-% SiC, Brenntemperatur 1165 bis 1180 °C (rechts)

“in line”, so to speak. Their Al_2O_3 content is nearly constant at approx. 4 mass %. The ceramic-bonded materials stand in contrast in that respect. In chemical terms, powdered masonry rubble comprising a mixture of various walling materials undergoes “autohomogenization”. The original differences between the various types of walling material become hardly noticeable, and the chemical composition can be ascertained as remaining extensively within the same range as that of expanded clay obtained from natural raw materials.

The experimental investigations included an analysis of the conditions of fabrication for lightweight aggregate, and the effects of the composition of the starting materials were studied. To that end, masonry rubble containing 48 mass % brick – corresponding closely to the mean value stated in »5 – was crushed, milled, doped with an expanding agent and granulated in a pelletizing mixer. Then, the green granules were simultaneously stabilized and expanded by thermal treatment in a laboratory rotary kiln. The thusly obtained lightweight aggregate

$\text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{Flussmittel} (\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + \text{MgO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$, mit dem grobkeramische Ausgangsstoffe beurteilt werden können, herangezogen (»7). Bei der Betrachtung der sortenreinen Bestandteile von Mauerwerkbruch liegen die mineralisch gebundenen Baustoffe Kalksandstein, Porenbeton und Beton gewissermaßen auf einer Linie. Ihr Al_2O_3 -Gehalt beträgt nahezu konstant ca. 4 Masse-%. Die keramisch gebundenen Baustoffe setzen sich deutlich davon ab. Im mehlfinein aufbereiteten Mauerwerkbruch als Gemisch der verschiedenen Wandbaustoffarten findet in chemischer Hinsicht eine „Autohomogenisierung“ statt. Die ursprünglichen Unterschiede zwischen den Wandbaustoffarten sind nur noch andeutungsweise sichtbar. Zusätzlich kann festgestellt werden, dass die chemische Zusammensetzung weitestgehend innerhalb des Feldes für die Blähtonherstellung aus natürlichen Rohstoffen liegt.

In den experimentellen Untersuchungen wurden die Bedingungen für die Herstellung der Aufbaukörnungen und der Einfluss der Zusammensetzung des Ausgangsmaterials untersucht. Dazu wurde Mauerwerkbruch mit einem Ziegelgehalt von 48 Masse-% – was nahezu dem in »5 angegebenen Mittelwert entspricht – vorzerkleinert, gemahlen, mit einem Blähmittel dotiert und in einem Pelletiermischer granuliert. Bei der anschließenden thermischen Behandlung in einem Labordrehrohrföfen wurden die Grüngranulate stabilisiert und gleichzeitig aufgebläht. Die Bewertung der hergestellten Aufbaukörnungen erfolgte anhand der Rohdichte, der Kornfestigkeit und der Wasseraufnahme.

Die Brenntemperatur der Blähgranulate aus Mauerwerkbruch liegt zwischen 1120 und 1180 °C. Sie entspricht damit der Brenntemperatur für Blähgranulate aus Tonen und Schiefern. Als Blähmittel eignet sich Siliciumcarbid. Bereits bei einem Zusatz von 1 Masse-% ist ein Bläh effekt zu verzeichnen, wie aus der Abnahme der Rohdichte abgelesen werden kann (»8). Bei einem Zusatz von 3 Masse-% lassen sich die geringsten Rohdichten erreichen, wenn die Verweilzeit im Blähintervall ausreicht, um eine vollständige Umsetzung des SiC zu gewährleisten. In den Laborversuchen, bei denen die Verweilzeit im Blähintervall weniger als 3 min betrug, war dafür ein zweimaliger Durchlauf erforderlich.

Zum Einfluss des Ziegelgehaltes des verwendeten Mauerwerkbruchs auf die Rohdichte der Aufbaukörnungen ergab sich, dass bereits bei Ziegelgehalten von etwa 20 Masse-% unter den im Labor realisierbaren Brennbedingungen Aufbaukörnungen mit Rohdichten unter 1000 kg/m³ herstellbar sind (»8). Die geringsten Rohdichten werden bei Ziegelgehalten im Bereich zwischen 40 und 70 Masse-% erreicht. Oberhalb von 70 Masse-% scheint es zu einem Anstieg der Rohdichte zu kommen. Insgesamt ist die entwickelte Aufbaukörnung also relativ robust gegenüber Schwankungen des Ziegelgehaltes des Ausgangsmaterials und deshalb prädestiniert für die Verwertung von Mauerwerkbruch. Der Anstieg der Rohdichte bei hohen Ziegelgehalten, die für Mauerwerkbruch aber eher untypisch sind, bedarf einer Präzisierung durch weitere Messungen. Schlüssige Erklärungen stehen noch aus.

Im Rahmen der Untersuchungen wurden Aufbaukörnungen mit unterschiedlichen Drehrohrföfen und zum Teil abweichenden Formgebungsverfahren in einer solchen Menge hergestellt, dass neben der Bestimmung der wichtigsten Eigenschaften auch erste Betonversuche durchgeführt werden konnten. Als Referenz dienten Blähtone mit vergleichbaren Rohdichten. Wie »9 zeigt, ist die Wasseraufnahme der Aufbaukörnungen etwas geringer als die

gates were then evaluated in terms of apparent density, particle strength and water absorption.

Situated between 1120 and 1180° C, the firing temperature for expanded aggregates based on masonry rubble corresponds to that of expanded aggregate of clay and shale. Silicon carbide serves well as an expansion agent. Adding as little as 1 mass % has an expanding effect, as indicated by a decrease in apparent density (»8). The lowest apparent density levels were achieved for an admixture of 3 mass %, if the expansion interval is held long enough to ensure complete conversion of the SiC. Laboratory experiments involving an expansion interval of less than 3 minutes necessitated a second run.

Regarding the extent to which the heavy clay content of the employed masonry rubble affects the apparent density of the lightweight aggregate, approx. 20 mass % brick content yielded lightweight aggregate with apparent densities below 1000 kg/m³ under the achievable laboratory firing conditions (»8). The lowest apparent density was reached for brick contents ranging between 40 and 70 mass %. Above 70 mass %, the apparent density appears to increase. All in all, the developed lightweight aggregate shows a relatively robust reaction to fluctuations in the brick content of the starting material and is therefore predestined for application in the recycling of masonry rubble. The rise in apparent density for high brick content, which is rather atypical for masonry rubble, requires further clarification via additional measurements. Conclusive explanations are still outstanding.

Within the framework of investigation, lightweight aggregate was produced in different rotary kilns according to partly disparate shaping methods and in quantities allowing both the determination of their essential properties and an initial number of concrete trials. Expanded clay with comparable apparent density serves as reference material. As shown in »9, the lightweight aggregate displayed somewhat lower water absorption than that of the expanded clay, while the particle strength of the mineral aggregates under comparison showed disagreement. The lightweight aggregate reliably satisfied all environmental parameters.

In the production of lightweight concrete, the lightweight aggregate replaced the entire mineral aggregate content with particle sizes > 2 mm, while a natural sand was used for the < 2 mm fraction. Additional water absorption of porous ag-

der Blähtone. Bei der Kornfestigkeit besteht für die gegenübergestellten Gesteinskörnungen kein Unterschied. Die leichte Aufbaukörnung hält alle umwelttechnischen Parameter sicher ein.

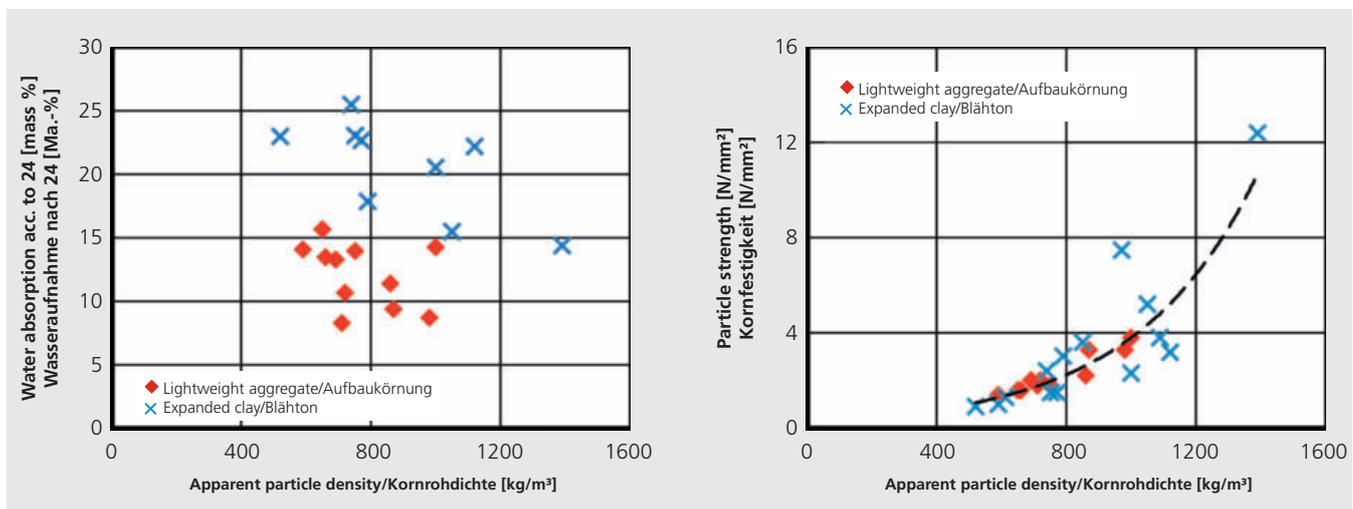
Bei der Leichtbetonherstellung ersetzt das Leichtgranulat die gesamte Gesteinskörnung ab 2 mm Korngröße. Unterhalb von 2 mm wurde ein Natursand zugesetzt. Eine zusätzliche Wasseraufnahme der porösen Granulate fand durch entsprechendes Vornässen Berücksichtigung. Bei den untersuchten Festbetoneigenschaften, wie Festigkeit, Elastizitätsmodul, Schwindverhalten, Carbonatisierung, Wassereindringtiefe und Frost-Widerstand, erzielten die mit den neu entwickelten Aufbaukörnungen hergestellten Betone durchweg vergleichbare Werte wie Betone mit herkömmlichem Blähton (»10).

Als Fazit kann aus den experimentellen Ergebnissen abgeleitet werden, dass sich Mauerwerkbruch als Matrixmaterial für die Blähgranulatherstellung eignet. Abschätzungen zum Energieaufwand für den thermischen Prozess zeigen leichte Vorteile gegenüber der Blähtonherstellung aus natürlichen Rohstoffen. Die Herstellung von Aufbaukörnungen könnte zur wirksamen Verringerung des Sulfatgehalts im Bauschutt genutzt werden, indem der Gips thermisch zersetzt und anschließend aus dem Rauchgas zurückgewonnen wird.

5 Schlussfolgerungen

Anhand der Stoffstrombetrachtungen kann abgeschätzt werden, dass gegenwärtig etwa gleiche Mengen an sortenreinem Ziegelbruch und gemischtem Mauerwerkbruch anfallen, vorausgesetzt, die groben Ziegelpartikel können effektiv aus dem aufbereiteten Mauerwerk abgetrennt werden. Für die sortenreinen Ziegelfractionen gibt es mehrere durch Vorschriften geregelte Einsatzgebiete wie die Vegetationstechnik, den Straßenbau und die Betonherstellung. Hinzu kommt die rohstoffliche Verwertung bei der Ziegelherstellung. Von der „hypothetischen“ Aufnahmefähigkeit her reichen diese Sektoren für das gesamte sortenrein anfallende Ziegelmaterial aus. In der Praxis spielt aber bisher nur die Vegetationstechnik eine Rolle.

Für die Mauerwerkfraktionen ist der Einsatz für Verfüllungen die gegenwärtig geübte Praxis. Die bautechnischen Anforderungen sind gering und können auch von den im Gemisch enthaltenen porösen, wenig festen Bestandteilen erfüllt werden. Die umwelttechnischen Anforderungen sind hoch. Insbesondere können sulfathaltige Baustoffe eine Deponierung



»9 Water absorption and particle strength of lightweight aggregate in comparison with expanded clay

»9 Abhängigkeit von Wasseraufnahme und Kornfestigkeit der Aufbaukörnungen im Vergleich zu den Blähtonen

»10 Mechanical properties of laboratory concrete made of lightweight mineral aggregates (LG: laboratory-produced lightweight mineral aggregate; HT: lightweight mineral aggregate from small-scale production)

»10 Mechanische Eigenschaften der Laborbetone aus leichten Aufbaukörnungen (LG: leichte Gesteinskörnung aus Laborherstellung, HT: leichte Gesteinskörnung aus kleintechnischer Herstellung)

gregate was allowed for by including an appropriate pre-wetting step. In all cases, concrete produced using the newly developed lightweight aggregate displayed hardened-concrete properties (strength, Young's modulus, shrinkage behaviour, carbonation, depth of penetration of water and frost resistance) that were thoroughly comparable to those of concrete containing conventional expanded clay (»10).

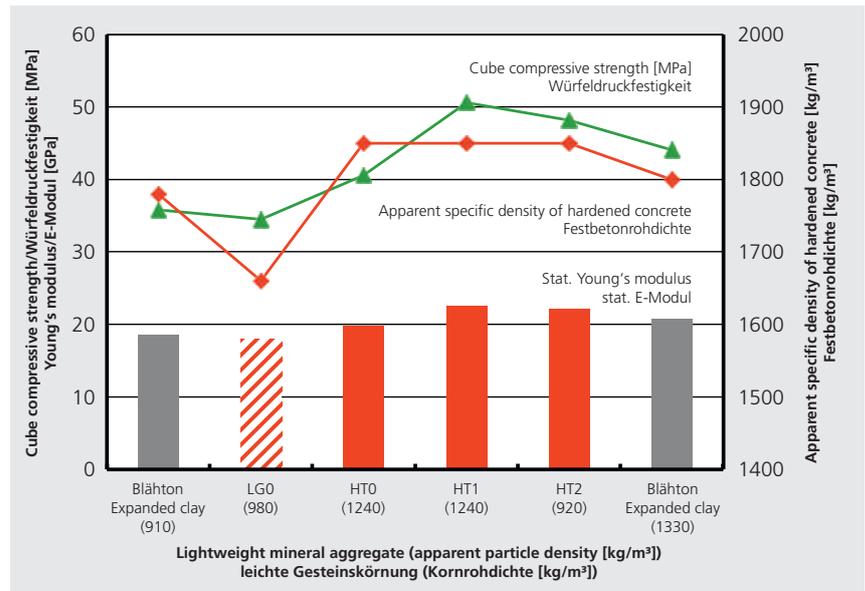
The conclusion to be drawn from the experimental findings is that masonry rubble makes a suitable matrix material for expanded aggregate. The estimated energy expenditure for the thermal process shows some advantage over the fabrication of expanded clay from natural raw materials. The manufacture of lightweight aggregate could serve to effectively reduce the sulphate content of building rubble via thermal decomposition of plaster, with subsequent recovery from the flue gas.

5 Conclusions

Based on the results of material flow analysis, and presuming that the coarse heavy clay particles can be effectively separated from the processed masonry, it may be assumed that the incident quantities of pure brick rubble and mixed masonry rubble are presently approximately equal. For the pure brick fractions, there are a number of regulated areas of applications such as vegetation engineering, road building and concrete production, all in addition to material salvaging in the manufacture of brick-based building ceramics. In terms of „hypothetical“ receptivity, these sectors suffice to consume the entire incident volume of brick and structural clay products. In actual practice, however, only vegetation engineering has achieved any degree of significance.

As far as the masonry fractions are concerned, present practice concentrates on backfilling options. The pertinent constructional requirements are few and can be fully satisfied by the porous, low-strength mixed constituents. The environmental requirements, however, are stringent. In particular, building material containing sulphate can require controlled deposition. One alternative to the solution is to salvage material from masonry rubble and use it for producing lightweight aggregate.

All such sophisticated recycling options presuppose proper, competent preparation, which easily can involve more expense and effort than would be necessary in the non-metallic minerals industry. Conceivably, however, the higher inputs could be compensated by shorter transportation routes, especially in cases where brick or masonry rubble can be used in place of such special materials as lava or pumice for roof greening projects or expanded clay for producing lightweight concrete, as those raw materials are only available from a few specific locations.



erforderlich machen. Eine Alternative ist die rohstoffliche Verwertung von Mauerwerkbruch zur Herstellung von Aufbaukörnungen.

Voraussetzung für jede der anspruchsvollen Verwertungsvarianten ist eine qualifizierte Aufbereitung, die durchaus einen größeren Aufwand als in der Steine-Erden-Industrie erfordern kann. Es ist aber vorstellbar, dass der höhere Aufwand durch kürzere Transportwege kompensierbar ist, besonders wenn spezielle Baustoffe wie Lava oder Bims für die Dachbegrünung oder Blähtone für die Leichtbetonherstellung, die rohstoffbedingt an nur wenigen Standorten verfügbar sind, aus Ziegel- oder Mauerwerkbruch hergestellt werden können.

IAB – Institut für Angewandte Bauforschung
Weimar gGmbH
www.iab-weimar.de

Literature/Literatur

- [23] Van Dijk, K.; Fraaij, A. L. A.; Hendriks, Ch., F.; Mulder, E.; van der Zwan, J.: Recycling of Masonry Debris as a Raw Material in the Ceramic Industry. Sustainable Concrete Construction. Proceedings of the Inter-national Conference held at the University of Dundee, Scotland, UK, September 2002, S. 291–304
- [24] Acchar, W.; Silva, J. E.; Segadaes, A. M.: Increased added value reuse of construction waste in clay based building ceramics. Waste Management Vol. 25 (2005), Issue 2, pp. 149-159
- [25] Koch, G.: Rohstoffreduktion in der Baustoffproduktion – Einsatz von Recyclingmaterial in der Ziegelindustrie. Vortrag IFF-Baustoff-FORUM, Weimar 2012
- [26] Puertas, F.; Garcia-Diaz, I.; Barba, A.; Gazulla M. F.; Palacios, M.; Gomez, M. P.; Martinez-Ramirez, S.: Ceramic wastes as alternative raw materials for Portland cement clinker production. Cement & Concrete Composites Vol. 30 (2008), pp. 798–805
- [27] Puertas, F.; Garcia-Diaz, I.; Palacios, M.; Gazulla, M. F.; Gómez, M. P.; Orduña, M.: Clinkers and cements obtained from raw mix containing ceramic waste as a raw material. Characterization, hydration and leaching studies. Cement & Concrete Composites Vol. 32 (2010), pp. 175–186
- [28] Lampl, C.: Sekundärrohstoffe – Anforderungen und Einsatzgebiete für die Baustoffe der Zukunft. Nachhaltige Nutzung von Baurestmassen. Österreichischer Wasser- und Abfallwirtschaftsverband, Wien 2009
- [29] Müller, A.; Schnell, A.; Rübner, K.: Aufbaukörnungen aus Mauerwerkbruch. Chemie-Ingenieur-Technik Vol. 84 (2012), No. 10, 1–13
- [30] Müller, A.; Schnell, A.; Rübner, K.: Die Herstellung von Leichtgranulaten aus Mauerwerkbruch. Mauerwerk 17 (2013), Heft 6