

Prof. Dr.-Ing. habil. Anette Müller, Dipl.-Ing. Ines Döring, Dipl.-Ing. Manuela Knorr, Dr. sc. nat. Annett Lipowsky, Dr.-Ing. Ulrich Palzer, Dr.-Ing. Barbara Leydolph

Developments in the recycling of clay bricks and brick masonry (Part 2)

Entwicklungen zum Recycling von Ziegeln und Ziegelmauerwerk (Teil 2)

Clay brick is a construction material with a long tradition. The further development of its product properties is the subject of a wide range of efforts. To confirm the sustainability of the construction material, the focus is now on its recyclability as a new issue. In collaboration with the clay brick and roofing tile industry, IAB Weimar and IZF Essen have worked on several aspects in related research. Part 2 concerns the use of clay brick as a substitute raw material.

Der Ziegel ist ein Baustoff mit langer Tradition. Seine Produkteigenschaften weiterzuentwickeln, ist Gegenstand vielfältiger Bemühungen. Um die Nachhaltigkeit des Baustoffs zu bestätigen, steht als neue Fragestellung seine Rezyklierbarkeit im Fokus. Gemeinsam mit der Ziegelindustrie wurden am IAB Weimar und am IZF Essen mehrere Forschungsthemen bearbeitet. Teil 2 befasst sich mit dem Ziegel als Rohstoffsubstitut.

4 Focus 2: Bricks as a substitute raw material

The focus here was the use of fine-grained broken bricks from building demolition as raw material components for the production of new bricks. As derived from the studies described in the literature [6], [7], [8], the particle size of brick flour used as a secondary raw material should not exceed 200 µm. The total sulphur content should remain below 0.5 mass%. Other requirements are related to the calcareous components, which are limited by the following recommendations:

- › Loss on ignition < 3 mass%
- › Calcium carbonate content < 10 mass% and
- › Content of mortar and concrete < 20 mass%

In contrast to these requirements, in the studies described here, coarser-grained variants were used as a substitute raw material to test whether a direct use of brick sands is possible without additional comminution. Moreover, besides unmixed bricks from demolition, recyclates from various recycling companies were also subject of the studies. These contained considerable contents of non-brick mineral components and did not always fulfil the above-mentioned requirements.

4.1 Material and methods

The recyclates come from different sources. Unmixed, used brick varieties, that can be classified in certain qualities, were selectively removed as rubble from building structures that were being prepared for demolition or actually in the process of demolition. In addition, unmixed brick rubble, which consisted predominantly of clinker bricks and roofing tiles, was supplied by a recycling company. The other used material came from different sources. The new brick rubble was available thanks to the "Filled brick recycling" research project (»15).

The procured recyclates were first sized in fractions smaller and larger than 4 mm. The fractions < 4 mm were characterized in detail in respect of those properties that are important for recycling as a secondary raw material. The total sulphur content

4 Schwerpunkt 2: Ziegel als Rohstoffsubstitut

Im Mittelpunkt stand die Verwertung von feinkörnigem Ziegelbruch aus dem Gebäuderückbau als Rohstoffkomponente für die erneute Ziegelherstellung. Wie aus den in der Literatur beschriebenen Untersuchungen [6], [7], [8] hervorgeht, sollte die Partikelgröße des eingesetzten Sekundärrohstoffs Ziegelmehl 200 µm nicht überschreiten. Der Gesamtschwefelgehalt sollte unterhalb von 0,5 Masse-% liegen. Die weiteren Anforderungen beziehen sich auf kalkhaltige Bestandteile, die durch folgende Empfehlungen begrenzt werden:

- › Glühverlust < 3 Masse-%
- › Calciumcarbonatgehalt < 10 Masse-% und
- › Gehalt an Mörtel und Beton < 20 Masse-%

Im Gegensatz zu diesen Anforderungen wurden in den hier beschriebenen Untersuchungen grobkörnigere Varianten als Rohstoffsubstitut eingesetzt, um zu erproben, ob ein direkter Einsatz von Ziegelsanden ohne zusätzliche Zerkleinerung möglich ist. Außerdem waren neben sortenreinen Ziegeln aus dem Rückbau auch Rezyklate verschiedener Recyclingunternehmen Gegenstand der Untersuchungen. Diese enthielten erhebliche Anteile ziegelfremder mineralischer Bestandteile und erfüllten die oben genannten Anforderungen nicht immer.

4.1 Material und Methoden

Die Rezyklate stammen aus unterschiedlichen Quellen. Sortenreine gebrauchte Ziegelvarietäten, die bestimmten Qualitäten zugeordnet werden können, wurden selektiv aus Bauwerken, deren Rückbau sich in Vorbereitung oder in der Realisierung befand, als Bruch entnommen. Zusätzlich wurde sortenreiner Ziegelbruch, der überwiegend aus Klinkern und Dachziegeln bestand, von einem Recyclingunternehmen bezogen. Das weitere Altmaterial stammte aus unterschiedlichen Quellen. Der neue Ziegelbruch stand dank des Forschungsprojektes „Füllziegelrecycling“ zur Verfügung (»15).

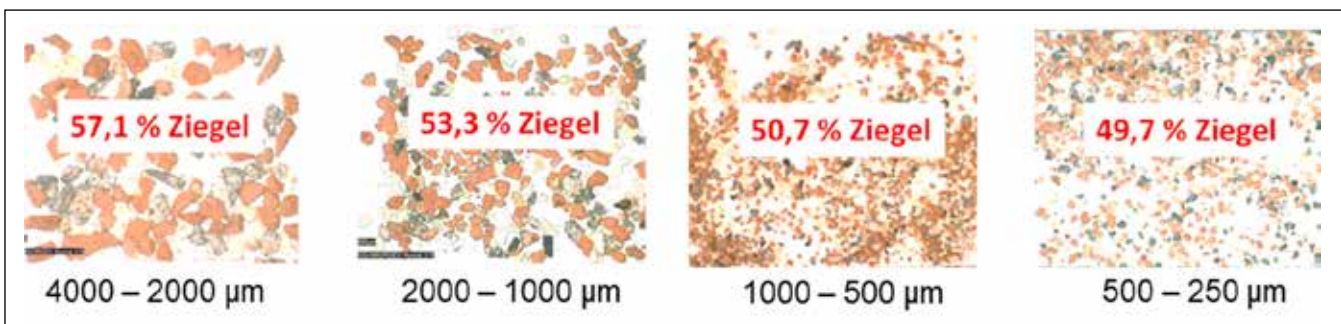
Die beschafften Rezyklate wurden zunächst in die Fraktionen kleiner und größer 4 mm klassiert. Die Fraktionen < 4 mm wur-



Pictures/Bilder: Authors/Autoren

»15 Fraction 2/4 mm of selected recyclates used as substitute raw material from left to right: Clay pavers (B), vertically perforated bricks (K), brick-rich building rubble (R), masonry rubble (V)

»15 Fraktion 2/4 mm ausgewählter, als Rohstoffsubstitut eingesetzter Rezyklate von links nach rechts: Pflasterklinker (B), Hochlochmauerziegel (K), ziegelreicher Bauschutt (R), Mauerwerkbruch (V)



»16 Microscope images of various fractions of Brick Specimen F

»16 Mikroskopaufnahmen verschiedener Fraktionen der Ziegelprobe F

was determined with a sulphur-carbon analyser, the CaO content by means of X-ray fluorescence analysis and the carbonate content by means of differential thermal analysis. The material compositions of the recyclates was analysed by counting the particles by colour under a digital microscope. Preliminary tests showed that, with this method, it was possible to differentiate between brick particles and mortar and render to a particle size of 250 µm based on colour. Above this limit, the brick content increases slightly with increasing particle size (»16). As described above, that is because of the easier comminution of the mortars and renders compared to that of the bricks. For the counting of the brick content, from all samples, the 1/2 mm fraction was selected. The composition of the recyclates from dismantling and demolition showed strong fluctuations. The brick content varied from 100% in the case of unmixed brick material to a brick content of approx. 20% in the masonry rubble. The new bricks had an average brick content of 80%. Other components contained in the mixes were in the case of the used recyclates mortar, render, concrete and some unidentifiable components. In the case of the new bricks, mortar, render and mineral wool remnants were present as minor constituents.

In the case of the recyclates, the samples that contained a low content of brick and high content of residual particles, exhibited higher values for the analysed parameters than the unmixed bricks (»Table 2). The recommended quality parameters were only partly met by these recyclates. For the new backing bricks, almost all parameters were exceeded.

From the originally available 18 recyclate samples, the samples C, D, H, R, T and V were selected as these represented a

den ausführlich hinsichtlich der Eigenschaften, die für die Verwertung als Sekundärrohstoff maßgeblich sind, charakterisiert. Der Gesamtschwefelgehalt wurde mittels Schwefel-Kohlenstoff-Analysator, der CaO-Gehalt mittels Röntgenfluoreszenzanalyse und der Carbonatgehalt mittels Differential-Thermoanalyse bestimmt. Die Materialzusammensetzung der Rezyklate wurde durch Auszählen der Partikel nach deren Farbe unter einem Digitalmikroskop ermittelt. Vorversuche ergaben, dass mit dieser Methode die Unterscheidung zwischen Ziegelpartikeln und Mörtel- bzw. Putzpartikeln bis zu einer Partikelgröße von 250 µm anhand der Farbe möglich ist. Oberhalb dieser Grenze nimmt der Ziegelgehalt mit zunehmender Partikelgröße leicht zu (»16). Das wird – wie oben bereits beschrieben – durch die leichtere Zerkleinerbarkeit der Mörtel und Putze gegenüber den Ziegeln verursacht. Für die Auszählung des Ziegelanteils wurde von allen Proben die Fraktion 1/2 mm ausgewählt. Die Zusammensetzung der Rezyklate aus Rückbau und Abbruch zeigte starke Schwankungen. Der Ziegelanteil variierte von 100% bei sortenreinem Ziegelmaterial bis hin zu einem Ziegelanteil von ca. 20% für Mauerwerkbruch. Die neuen Ziegel hatten einen durchschnittlichen Ziegelanteil von 80%. Weitere, in den Gemischen enthaltene Komponenten waren bei den Altzyklaten Mörtel, Putz, Beton und zum Teil nicht identifizierbare Bestandteile. Bei den neuen Ziegeln traten Mörtel, Putz und Mineralwollreste als Nebenbestandteile auf.

Bei den Rezyklaten wiesen die Proben, die geringe Ziegelgehalte und hohe Gehalte an Restpartikeln enthielten, höhere Werte der analysierten Parameter als die sortenreinen Ziegel auf (»Tabelle 2). Die empfohlenen Qualitätsparameter wurden von



»17 Arrangement of the specimens during firing
 »17 Anordnung der Probekörper während des Brandes

wide range of recycled materials. They were added to the three bodies used as base materials

- › lime-free roofing tile clay (DZ)
- › pyrite-containing facing brick clay (VMZ) and
- › high-carbonate vertically perforated brick clay (HLZ)

The amounts added reached a maximum of 10 mass% for the roofing tile body while up to 25 mass% was added to the

»Table 2 Quality characteristics of the recyclates used
 »Tabelle 2 Qualitätsmerkmale der verwendeten Rezyklate

| | Loss on ignition Glühverlust 1025 °C | CaO | Total sulphur Gesamtschwefel | Carbonates Carbonate | Composition of the 1/2 mm fraction Zusammensetzung der Fraktion 1/2 mm | |
|---|--|---------|---------------------------------|-------------------------|---|-------------------------------------|
| | Gravimetry Gravimetrie | XRF/RFA | S-C-Analyser S-C-Analysator | XRD | Microscopy Mikroskopie | |
| | [mass %/Masse-%] | | | | Brick/Ziegel | Remaining particles Restpartikel |
| [%] | | | | | | |
| Recyclates from demolition projects and recycling companies Rezyklate aus Abbruchobjekten und von Recyclingunternehmen | | | | | | |
| B | 0.72 | 1.54 | 0.04 | 0 | 100 | 0 |
| C | 1.87 | 1.64 | 0.29 | 0 | 100 | 0 |
| F | 3.42 | 6.55 | 0.32 | 1.5 | 53.3 | 46.7 |
| R | 13.13 | 17.9 | 0.79 | 21.5 | 41.2 | 58.8 |
| S | 7.24 | 9.78 | 0.20 | 10 | 25.2 | 74.8 |
| T | 1.86 | 1.09 | 0.12 | 1 | 93.3 | 6.7 |
| V | 5.33 | 9.03 | 0.21 | 6 | 20.3 | 79.7 |
| W | 3.56 | 6.06 | 0.33 | 4 | 73.3 | 26.7 |
| New backing bricks/Neue Hintermauerziegel | | | | | | |
| D | 8.57 | 17.50 | 0.16 | 4 | 86.7 | 13.3 |
| J | 11.10 | 22.57 | 0.92 | 20 | 80.2 | 19.8 |
| G | 10.85 | 20.97 | 1.14 | 18 | 59.7 | 40.3 |
| H | 12.17 | 22.57 | 1.10 | 20.5 | 78.9 | 21.1 |
| K | 10.38 | 23.74 | 0.93 | 21 | 85.4 | 14.6 |
| L | 12.07 | 25.0 | 0.88 | 22 | 80.6 | 19.4 |
| M | 11.75 | 24.40 | 0.88 | 22 | 84.3 | 15.7 |
| N | 11.58 | 26.9 | 1.06 | 24 | 79.6 | 20.4 |
| P | 8.53 | 19.18 | 1.25 | 13.5 | 80.8 | 19.2 |
| Q | 8.29 | 19.92 | 1.05 | 15 | 86.5 | 13.5 |

diesen Rezyklaten nur zum Teil erfüllt. Bei den neuen Hintermauerziegeln traten bei nahezu allen Parametern Überschreitungen auf.

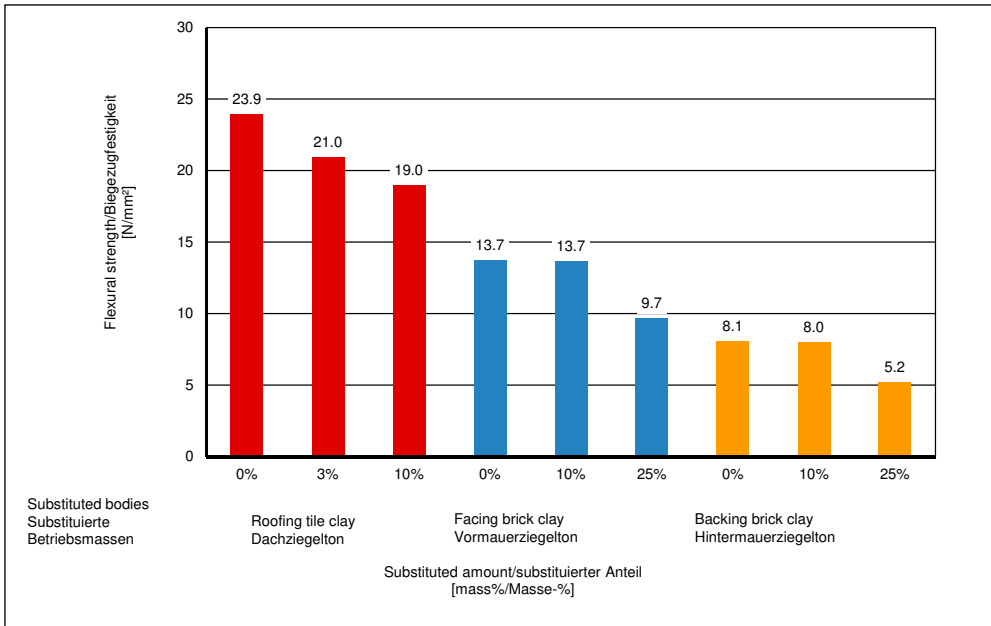
Aus den ursprünglich zur Verfügung stehenden 18 Rezyklatproben wurden die Proben C, D, H, R, T und V ausgewählt, da diese einen breiten Bereich an Recyclingmaterialien repräsentieren. Sie wurden den drei als Basismaterial dienenden Betriebsmassen

- › kalkfreier Dachziegelton (DZ)
- › pyrithaltiger Vormauerziegelton (VMZ) und
- › karbonatreicher Hochlochziegelton (HLZ)

zugesetzt. Die Dotierungen betragen bei der Dachziegelmasse maximal 10 Masse-%, während dem Hintermauerziegelton bis zu 25 Masse-% zugegeben wurden. Ausgewählte Eigenschaften der Basismaterialien sind in »Tabelle 3 zusammengefasst.

Die Partikelgrößenverteilung der Ausgangsmaterialien hat entscheidende Bedeutung für die Ziegelherstellung. Sie beeinflusst die Menge des nötigen Anmachwassers, das Schwindungsverhalten, die Trocknungseigenschaften und das Brennverhalten. Als Bewertungsmaßstab dienen die Anteile in den Fraktionen 2 µm, 2–20 µm und > 20 µm. Hier bestehen besonders gravierende Unterschiede zwischen den Rezyklaten und den Betriebsmassen (»Tabelle 4).

Um die Auswirkungen auf die Produkteigenschaften zu ermitteln, wurden den Betriebsmassen Rezyklate zugegeben, wo-



»18 Flexural strength of the fired specimens prepared from the different bodies as a function of the substituted percentage of unmixed roofing tile recycle

»18 Biegezugfestigkeit der gebrannten Probekörper aus den verschiedenen Betriebsmassen in Abhängigkeit vom substituierten Anteil an sortenreinem Dachziegelrezyklat

backing brick clay. Selected properties of the base materials are summarized in »Table 3.

The particle size distribution of the starting materials has crucial importance for brick production. It influences the quantity of the required mixing water, the shrinkage behaviour, the drying properties, and the firing behaviour. The contents in the fractions 2 µm, 2–20 µm and >20 µm serve as a benchmark for evaluation. Here, there are major differences between the recycles and the bodies (»Table 4).

To determine the effects on the product properties, recycles were added to the bodies, the amounts added being oriented to the requirements to be met by the specific product. In the case of the roofing tile bodies, a maximum of 10 mass% was substituted with the recycles. In the facing and vertically perforated brick bodies, on the other hand, up to 25 mass% was substituted. From the batches, cylindrical specimens with a diameter of 33 mm were produced in a laboratory extruder and then fired in a gas-heated muffle kiln in accordance with the firing curves used in the respective production plants (»17).

Before being fired, the specimens were tested to ascertain their dry shrinkage and flexural strength. For the fired specimens, the density, the water absorption, the firing shrinkage and the flexural strength were determined. The appearance of the fired specimens was appraised, especially in respect of the occurrence of lumps of lime and efflorescence. Tests on eluates

bei sich die Zugabemenge an den Anforderungen, die an das jeweilige Produkt gestellt werden, orientierten. Bei den Dachziegelbetriebsmassen wurden maximal 10 Masse-% durch die Rezyklate ersetzt. Bei den Vormauer- und Hochlochziegelbetriebsmassen wurden hingegen bis zu 25 Masse-% substituiert. Aus den Versätzen wurden in einem Laborextruder zylindrische Probekörper mit einem Durchmesser von 33 mm hergestellt und in einem gasbeheizten Muffelofen entsprechend den Betriebsbrennkurven der jeweiligen Werke gebrannt (»17).

Von den ungebrannten Probekörpern wurden die Trockenschwindung und die -biegezugfestigkeit untersucht. An den gebrannten Probekörpern wurden die Rohdichte, die Wasseraufnahme, die Brennschwindung und die Biegezugfestigkeit ermittelt. Eine Begutachtung des Erscheinungsbildes, insbesondere hinsichtlich des Auftretens von „Kalkspatzen“ und Ausblühungen, fand statt. Untersuchungen an Eluaten mit einem Wasser-Feststoff-Verhältnis von 10 zu 1 wurden zur Bewertung der umwelttechnischen Eigenschaften durchgeführt.

4.2 Ergebnisse

Bei den zur Substituion verwendeten Rezyklaten kann zwischen sortenreinen, aus Dachziegeln hervorgegangenen und mineralisch verunreinigten Varietäten unterschieden werden. Bei Zugabe von sortenreinem Dachziegelbruch zum Dachziegelton traten bereits bei 3 Masse-% ein Rückgang der Festigkeit und ein

»Table 3 Characteristics of the bodies used

»Tabelle 3 Merkmale der verwendeten Betriebsmassen

| | Loss on ignition Glühverlust 1025 °C | Total sulphur Gesamtschwefel | CaO | Mineralogical composition Mineralogische Zusammensetzung XRD | | |
|---|--|---------------------------------|------------|---|------------------------------|-------------------------|
| | Gravimetry Gravimetrie | S-C-Analyzer S-C-Analysator | YRF RFA | Quartz Quarz | Clay minerals Tonminerale | Carbonates Carbonate |
| | [mass %/Masse-%] | | | | | |
| Roofing tile clay Dachziegelton (DZ) | 4.0 | n.k./n.b. | 0.90 | 29 | 59 | 0.5 |
| Facing brick clay Vormauerziegelton (VMZ) | 5.3 | 0.31 | 3.31 | 33 | 56 | 1.5 |
| Vertically perforated brick clay Hochlochziegelton (HLZ) | 22.2 | 0.13 | 14.38 | 18 | 43 | 26 |

»Table 4 Fraction percentages of the starting materials in three characteristic particle size classes

»Tabelle 4 Fraktionsanteile der Ausgangsmaterialien in drei charakteristischen Kornklassen

| | [mass%/ Masse-%] | Recyclates Rezyklate | Bodies Betriebsmassen | | |
|---------|---------------------|--------------------------|----------------------------|--------------------------------|---|
| | | Mean value Mittelwert | Roofing tile Dachziegel | Facing brick Vormauerziegel | Vertically perforated brick Hochlochziegel |
| > 20 µm | | 92.5 | 30.9 | 51.8 | 40.3 |
| 2–20 µm | | 7.0 | 26.2 | 17.7 | 33.4 |
| < 2 µm | | 0.5 | 42.9 | 30.6 | 26.3 |

with a water-solid ratio of 10 to 1 were performed to evaluate environmentally related properties.

4.2 Results

In case of the recyclates used for substitution, it is possible to differentiate between unmixed varieties recovered from roofing tiles and those with mineral impurities. With the addition of unmixed crushed roofing tiles to the roofing tile clay, already at 3 mass%, a decline in the strength and an increase in the water absorption were observed. The facing brick and vertically perforated brick clays were more robust (»18, 19). Up to a substitution of 10 mass%, no decrease in strength could be observed. Water absorption did not change or decreased. The body became denser.

With the addition of varieties with minor constituents, the substituted content was not sufficient as an index because in this way it was not possible to take the impurities explicitly into account. The sum of the substituted amount and impurities introduced as a result, is used as an auxiliary variable. With a substitution of 10 mass% with a content of impurities of 20 mass%, this index amounts to $(10 + 10 \times 20/100)$ mass% = 12 mass%. Plausible dependences result between this index and the properties of the fired specimens. At the same substituted amount, the substitute with more impurities leads to a stronger decline in strength than that with a low content of impurities (»18). With this formal approach, it is not possible to take account of how the type of impurities influences the properties (»20).

Another important quality characteristic is the visual appearance of the fired products. In the case of the roofing tile clay, a system can be identified. Substitutes with no or only a low

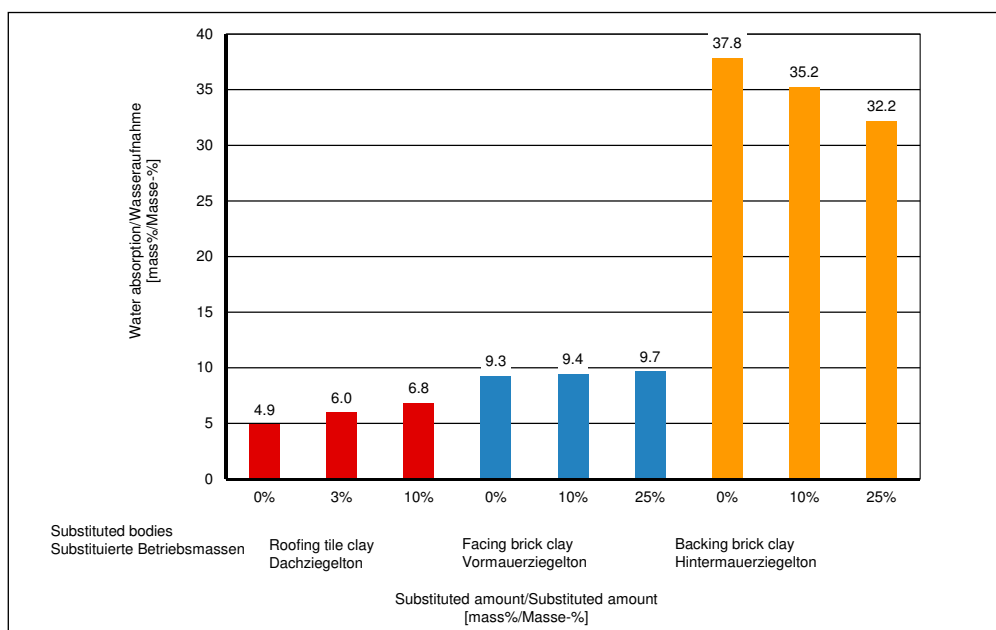
Anstieg der Wasseraufnahme auf. Vormauerziegel- und Hochlochziegelton waren robuster (»18, 19). Bis zu einer Substitution von 10 Masse-% war kein Festigkeitsrückgang zu verzeichnen. Die Wasseraufnahme veränderte sich nicht bzw. nahm ab. Der Scherben wurde also dichter.

Bei Zugabe der Varietäten mit Nebenbestandteilen reicht der substituierte Anteil als Kennzahl nicht aus, weil so die Fremdbestandteile nicht explizit berücksichtigt werden können. Als Hilfsgröße wird die Summe aus substituiertem Anteil und dadurch eingetragene Fremdbestandteile verwendet. Bei einer Substitution von 10 Masse-% mit einem Gehalt an Fremdbestandteilen von 20 Masse-% beträgt diese Kennzahl beispielsweise $(10 + 10 \times 20/100)$ Masse-% = 12 Masse-%. Zwischen dieser Kennzahl und den Eigenschaften der gebrannten Proben ergeben sich plausible Abhängigkeiten. Bei gleichem substituierten Anteil führt das Substitut mit mehr Fremdbestandteilen zu einem stärkeren Festigkeitsrückgang als das mit niedrigem Fremdstoffgehalt (»18). Wie die Art der Fremdstoffe die Eigenschaften beeinflusst, kann mit dieser formalen Betrachtungsweise nicht berücksichtigt werden (»20).

Ein weiteres, wichtiges Qualitätsmerkmal stellt das optische Erscheinungsbild der gebrannten Produkte dar. Beim Dachziegelton ist eine Systematik zu erkennen. Substitute mit keinen oder nur geringen Anteilen an Fremdbestandteilen können in Mengen bis zu 3 Masse-% zugegeben werden, ohne dass optische Beeinträchtigungen auftreten (»Tabelle 5). Bereits der Ziegelbruch D, der 13,3 Masse-% Fremdbestandteile enthält, führt bei 3 % Substitution in geringem Ausmaß zu „Kalkspatzen“. Werden 10 % der Dachziegelmasse durch Rezyklate substitu-

»19 Water absorption of the fired specimens prepared from the different bodies as a function of the substituted percentage of unmixed roofing tile recycle

»19 Wasseraufnahme der gebrannten Probekörper aus den verschiedenen Betriebsmassen in Abhängigkeit vom substituierten Anteil an sortenreinem Dachziegelrezyklat



»Table 5 Visual appearance of fired specimens

»Tabelle 5 Optisches Erscheinungsbild der gebrannten Probekörper

| | Roofing tile clay Dachziegelton | | Facing brick clay Vormauerziegelton | | | Backing brick clay Hintermauerziegelton | | |
|--|------------------------------------|--------|--|----------|-------|--|--------|--|
| | Addition/Zugabe Mass/Masse [%] | | | | | | | |
| | 3 | 10 | 3 | 10 | 25 | 10 | 25 | |
| C Roofing tile/Dachziegel: 0% | Green | Yellow | White | Yellow | Green | Orange | Yellow | |
| D VPB, unfilled/HLZ, unverfüllt: 13.3% | Yellow | Orange | White | Orange | Red | Yellow | Orange | |
| R Brick-rich rubble ziegelreicher Bauschutt: 58.8% | Orange | Yellow | Orange | Dark Red | White | Dark Red | Yellow | |
| T Crushed brick/Ziegelbruch: 6.7% | Green | Yellow | White | White | White | White | White | |
| H HPB, filled/HLZ, verfüllt: 21.1% | White | Yellow | White | White | White | Red | Orange | |
| V Crushed masonry Mauerwerkbruch: 79.7% | White | White | Yellow | Orange | White | White | White | |
| No impairment of visual appearance Keine optische Beeinträchtigung | | | Green | | | | | |
| Slight impairment of visual appearance Geringe optische Beeinträchtigung | | | Yellow | | | | | |
| Medium impairment of visual appearance Stärkere optische Beeinträchtigung | | | Orange | | | | | |
| Strong impairment of visual appearance Starke optische Beeinträchtigung | | | Red | | | | | |
| Very strong impairment of visual appearance Sehr starke optische Beeinträchtigung | | | Dark Red | | | | | |

content of impurities can be added in quantities up to 3 mass %, without any impairment of the visual appearance (»Table 5). Already crushed brick D, which contains 13.3 mass% impurities, leads in the case of 3% substitution to “lime lumps” to a limited extent. If 10% of the roofing tile body is substituted with recycles, impairment of the visual appearance is established for all substitutes. In the case of the other products, hardly any tendencies could be identified. The impairment of the appearance does not always increase with the quantity added. In three cases, even some improvements result with higher added quantities.

In the scope of the eluate analyses, the leaching behaviour of the specimens with an addition of 10% RC materials was tested. Both the values in respect of heavy metals and soluble in water salts can be classed as harmless, although the particle size in the sample preparation was selected to be much finer than specified in the relevant testing regulations. As a result, the surface area available for elution is much bigger than that for the particle size required in the relevant standards.

4.3 Recommendations

From the results presented, it can be concluded that the bodies for brick production can be substituted to a certain extent. The extent of substitution depends both on the product and the properties of the substitutes. No more than 3 mass% crushed unmixed roofing tile should be added to the roofing tile clay so as not to impair the quality of the products. On the other hand, for the production of backing bricks, substitution up to at least 10 mass%, even with a high content of impurities, appears possible.

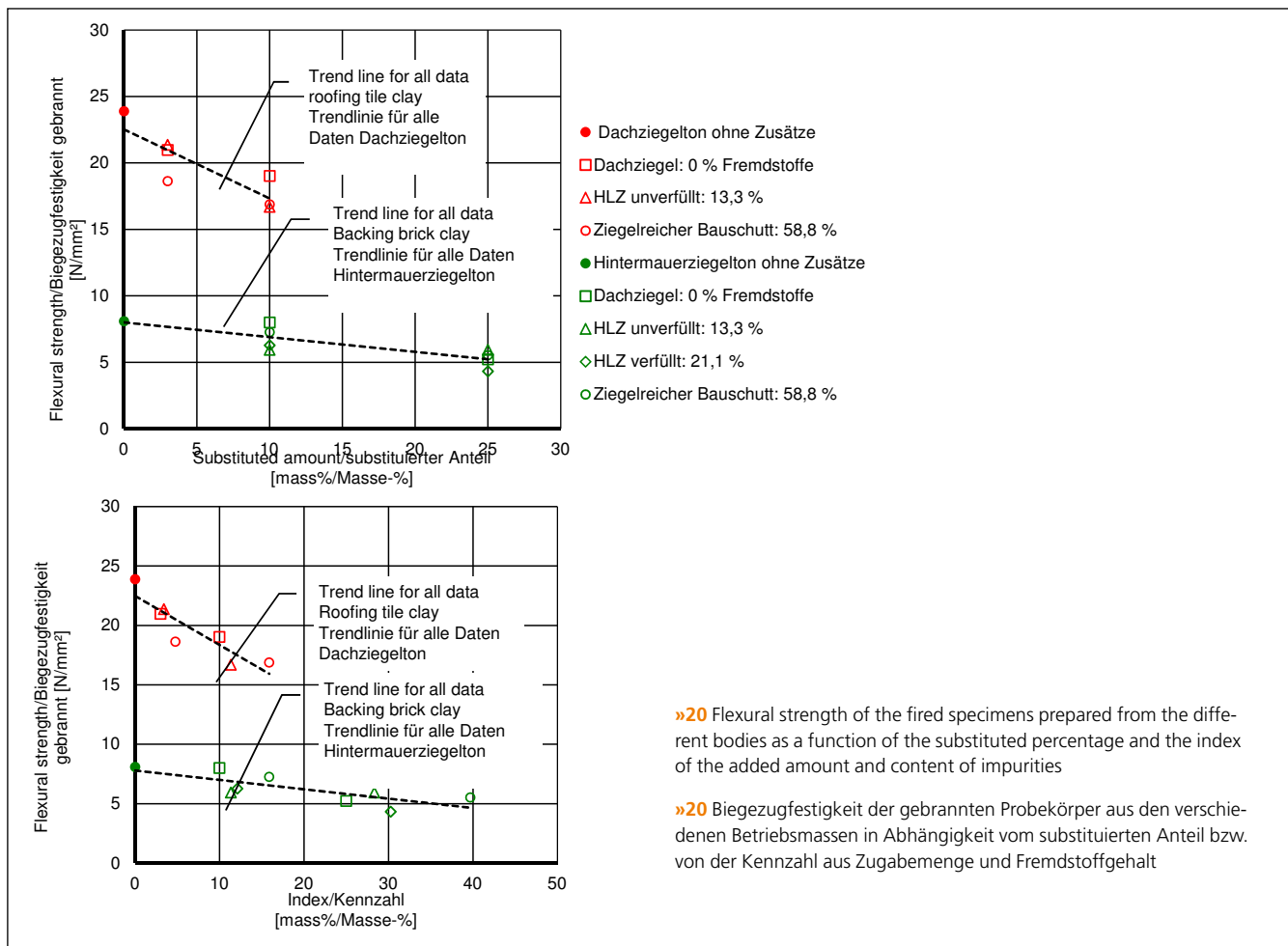
iert, werden bei allen Substituten optische Beeinträchtigungen festgestellt. Bei den anderen Produkten sind kaum Tendenzen erkennbar. Die optischen Beeinträchtigungen nehmen nicht immer mit der Zugabemenge zu. In drei Fällen ergaben sich bei höheren Zugabemengen sogar Verbesserungen.

Im Rahmen der Eluatanalysen wurde das Auslaugverhalten der Proben bei einer Zugabe von 10 % RC-Materialien untersucht. Sowohl die Werte bezüglich der Schwermetalle als auch die Werte der wasserlöslichen Salze können als unbedenklich eingestuft werden, obwohl die Partikelgröße in der Probenvorbereitung deutlich feiner ausgewählt wurde, als in den einschlägigen Prüfvorschriften gefordert. Hierdurch ist die der Elution zur Verfügung stehende Oberfläche erheblich größer als bei der in den einschlägigen Normen geforderten Korngröße.

4.3 Empfehlungen

Aus den vorgelegten Ergebnissen kann gefolgert werden, dass Betriebsmassen für die Ziegelherstellung durch Rezyklate teilweise substituiert werden können. Der Umfang der Substitution hängt sowohl vom Produkt als auch von den Eigenschaften der Substitute ab. Dem Dachziegelton sollten nicht mehr als 3 Masse-% sortenreiner Dachziegelbruch zugegeben werden, um die Qualität der Produkte nicht zu beeinträchtigen. Dagegen scheinen bei der Herstellung von Hintermauerziegeln Substitutionen bis mindestens 10 Masse-%, auch bei hohem Fremdstoffanteil der Substitute, möglich zu sein.

Die vorgelegten Ergebnisse sind durch weitere Untersuchungen zum Einfluss der Fremdbestandteile und der Partikelgröße



The presented results should be explored further with tests on the influence of the impurities and the particle size. In systematic tests, the effects of the type and percentage of the impurities on the brick quality should be determined, to make the index defined here more useful. All substitutes in the tests described were sands with particle sizes to 4 mm. They were very coarse compared with the bodies. According to the literature references, grinding of the substitutes leads to much improved results. The compressive strength increase ranges between 10 und 30%, when the additive materials with an original 90% undersize particle size of 0.5 mm is ground to a x_{90} particle size of 0.15 mm [9]. This potential for improving the properties and, where appropriate, higher substitution quotas should be the subject of future studies.


Acknowledgement

The results are based on research work (AiF-ZIM, AiF-IGF, EuroNorm) funded by Germany's Federal Ministry for Economic Affairs and Energy. We should like to thank the project sponsors for the financial support. Thanks are also due to the industry partners involved for their support of the research projects like Ziegel-Kontor Ulm GmbH Thermopor, Deutsche Poroton GmbH, Mein Ziegelhaus GmbH & Co. KG, Deutsche Rockwool GmbH & Co. KG, Wienerberger AG, Schlagmann Poroton GmbH & Co. KG. We thank Brick Research Institute Essen Regd for the good professional cooperation.

References in part 1, Zi2/2020.

zu vertiefen. In systematischen Untersuchungen sollten die Auswirkungen von Art und Anteil der Fremdbestandteile auf die Ziegelqualität ermittelt werden, um die hier definierte Kennzahl aussagekräftiger zu machen. Alle Substitute der dargestellten Untersuchungen waren Sande mit Partikelgrößen bis 4 mm. Sie waren damit im Vergleich zu den Betriebsmassen sehr grob. Nach Literaturangaben führt eine Mahlung der Substitute zu deutlich verbesserten Ergebnissen. Der Druckfestigkeitsanstieg liegt zwischen 10 und 30 %, wenn das Zugabematerial mit einer ursprünglichen 90%-Durchgang-Partikelgröße von 0,5 mm auf eine x_{90} -Partikelgröße von 0,15 mm gemahlen wird [9]. Dieses Potenzial zur Verbesserung der Eigenschaften und ggf. höherer Substitutionsquoten sollte Gegenstand zukünftiger Untersuchungen sein.

Danksagung

Die Ergebnisse basieren auf Forschungsarbeiten (AiF-ZIM, AiF-IGF, EuroNorm) und wurden finanziert vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. Wir möchten den Projektträgern für die finanzielle Unterstützung danken. Ein weiterer Dank gebührt den beteiligten Industriepartnern für ihre Unterstützung der Forschungsprojekte wie Ziegel-Kontor Ulm GmbH Thermopor, Deutsche Poroton GmbH, Mein Ziegelhaus GmbH & Co. KG, Deutsche Rockwool GmbH & Co. KG, Wienerberger AG, Schlagmann Poroton GmbH & Co. KG. Dem Institut für Ziegelforschung Essen e.V. danken wir für die gute fachliche Zusammenarbeit. 

Literatur siehe Teil 1, Zi2/2020.