

In the future, concrete production could increasingly rely on the use of recycled aggregates (see BFT International 04/2013, pp. 78). Part 2 of this article deals with concrete durability and the modeling of recycled-aggregate concrete.

Für die Betonherstellung könnten zukünftig zunehmend rezyklierte Gesteinskörnungen eingesetzt werden (siehe BFT International 04/2013, S. 78 ff.). In Teil 2 des Artikels geht es um die Dauerhaftigkeit und um die Modellierung von Rezyklatbeton.

# Opportunities and limitations of concrete recycling

## Chancen und Grenzen des Betonrecyclings

TEXT: Prof. Dr.-Ing. habil. Anette Müller

**Unlike concrete based on natural** aggregates, recycled-aggregate concrete contains two types of cement paste: the “new” paste creating concrete strength and the “old” paste whose parameters – such as its composition, water/cement ratio and degree of carbonation – are unknown. In addition, such concretes contain the “old” aggregates whose origin and properties are usually unknown, too. Both the components of recycled aggregates and the new cement paste and new aggregates may comprise compounds that may become involved in deleterious chemical reactions. Furthermore, the recycled aggregates cause an increase in porosity, thus facilitating the transport of moisture, which is required for all types of reactions.

Compared to natural-aggregate concrete, recycled-aggregate concrete generally involves a significantly larger number of factors that may impact durability. Although this situation is not necessarily associated with an adverse effect on durability, it presents greater difficulties when it comes to producing a durable concrete exactly to specification. Starting from the premise that the production and use of concretes containing recycled aggregates should not reveal any differences compared to conventional concrete, the use of recycled aggregates in Germany is restricted to certain strength, exposure and moisture classes. The DAfStb Code of Practice [48] specifies the use of recycled aggregates whose quality conforms to DIN 4226-100 [46] or to its successor standard [47]. According to this code of practice, coarse recycled aggregates of type 1 (concrete chippings) and of type 2 (chippings from demolished structures) may be used for producing concretes up to the C30/37 strength class.

**Im Unterschied zu Beton aus natürlichen** Gesteinskörnungen enthält Rezyklatbeton zwei Arten von Zementstein: Den „neuen“, die Festigkeit bewirkenden Zementstein und den „alten“ Zementstein, dessen Parameter wie Zusammensetzung, Wasserzementwert und Carbonatisierungszustand nicht bekannt sind. Hinzu kommt die „alte“ Gesteinskörnung, deren Herkunft und Eigenschaften in der Regel ebenfalls nicht bekannt sind. Aus den Komponenten der rezyklierten Gesteinskörnungen können ebenso wie aus dem neuen Zementstein und den neuen Gesteinskörnungen Reaktionspartner für Schadreaktionen herrühren. Zusätzlich verursachen die Rezyklate eine Erhöhung der Porosität, was den Transport von Feuchtigkeit als dem für alle Reaktionen notwendigen Reaktionspartner erleichtert.

Insgesamt gibt es bei Rezyklatbetonen deutlich mehr Faktoren, die auf die Dauerhaftigkeit wirken können, als bei Betonen aus natürlichen Gesteinskörnungen. Damit muss nicht zwangsläufig eine Verschlechterung der Dauerhaftigkeit verbunden sein. Die zielsichere Herstellung eines dauerhaften Betons wird dadurch aber schwieriger. Ausgehend von dem Leitgedanken, dass bei der Herstellung und Nutzung von Betonen aus rezyklierten Gesteinskörnungen keine Unterschiede zu herkömmlichen Betonen auftreten sollen, ist der Einsatz von Rezyklaten in Deutschland auf bestimmte Festigkeits-, Expositions- und Feuchtigkeitsklassen beschränkt. Die DAfStb-Richtlinie [48] regelt den Einsatz von Rezyklaten, deren Qualität der Norm DIN 4226-100 [46] beziehungsweise ihrer Nachfolgenorm [47] entsprechen. Danach dürfen aus groben rezyklierten Gesteinskörnungen vom Typ 1 – Betonsplitt – und von Typ 2 – Bauwerkssplitt – Betone bis zur Festigkeitsklasse C 30/37 hergestellt werden.

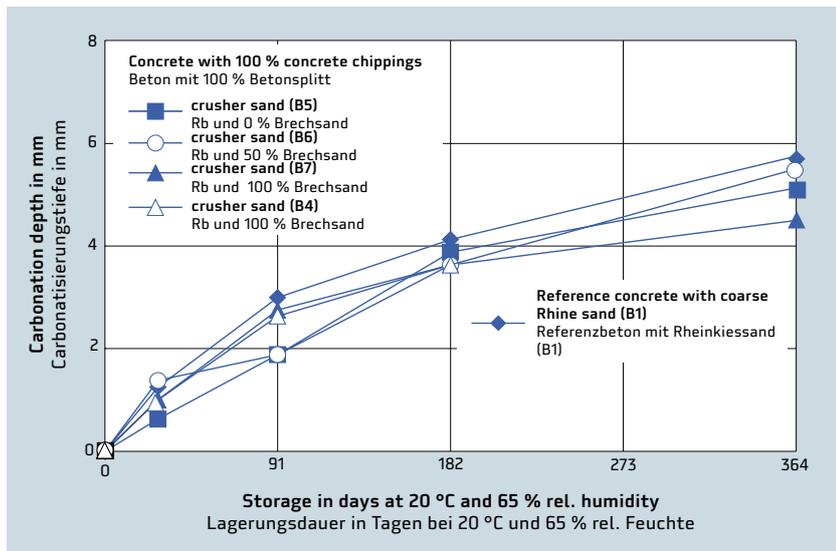


Figure: Kerkhoff, Siebel

Carbonation depth of concretes containing defined recycled aggregates produced for the tests [49]. Ra: recycled aggregates from a three-month old concrete of strength class B 15 with  $w/c = 0.68$ ; Rb: recycled aggregates from a three-month old concrete of strength class B 45 with  $w/c = 0.48$

Carbonatisierungstiefe von Betonen aus definierten, für die Versuche hergestellten rezyklierten Gesteinskörnungen [49]. Ra: Rezyklate aus einem 3 Monate alten Beton der Festigkeitsklasse B 15 mit  $w/z = 0,68$ ; Rb: Rezyklate aus einem 3 Monate alten Beton der Festigkeitsklasse B 45 mit  $w/z = 0,48$

### Durability and carbonation

Recycled sand usually contains a high amount of cement paste and other, more easily crushable constituents with lower bulk densities and strengths, and is thus excluded from being used in concrete production. The permissible share of coarse recycled aggregates in the total aggregate decreases in line with the magnitude of in-service stresses and actions. Thus the highest ratios of 45 vol.-% (type 1) and 35 vol.-% (type 2) may be used under the conditions specified in class WO/XC1, which are usually relevant to structural components in interiors. The lower shares of 35 and 25 vol.-% apply to concretes that are moist on frequent occasions or during extended periods of use and are exposed to freeze/thaw cycles or minor chemical attacks, as well as to concretes with high water penetration resistance.

This pragmatic approach takes account of the fact that the amount of conclusive and consistent evidence regarding the durability of recycled-aggregate concretes is still scarce. For example, the findings cited in the literature with respect to carbonation reveal significant differences. Both unchanged conditions and greater carbonation depths were measured. Two examples taken from the literature [49] [43] should illustrate this situation:

- » Figure 12 shows the carbonation depth of recycled-aggregate concretes containing coarse and, to a certain extent, also fine recycled aggregates in comparison to concrete containing natural aggregates. The recycled aggregates were produced from concretes in various strength classes at an age of three months.
- » Figure 13 shows the carbonation depth of concretes containing recycled aggregates that were taken from a demolished canal lock.

The carbonation depth of the concrete that contains the early-age recycled aggregates with defined parameters does not differ from the reference concrete. In contrast, the carbonation depth of the concrete containing the aggregates from the demolished lock is significantly greater than that of the reference concrete.

### Dauerhaftigkeit und Carbonatisierung

RC-Sande, in denen in der Regel der Zementstein und andere leichter zerkleinerbare Bestandteile mit geringeren Rohdichten und Festigkeiten angereichert sind, sind von der Verwertung zur Betonherstellung ausgeschlossen. Der erlaubte Anteil der groben Rezyklate an der Gesteinskörnung wird mit zunehmender Beanspruchung während der Nutzung reduziert. Die höchsten Anteile von 45 Vol.-% für Typ 1 beziehungsweise 35 Vol.-% für Typ 2 dürfen demzufolge bei den Bedingungen WO/XC1 verwendet werden, wie sie bei Bauteilen in Innenräumen auftreten. Die geringeren Anteile von 35 beziehungsweise 25 Vol.-% gelten für Betone, die während der Nutzung häufig oder längere Zeit feucht sind und Frostbeanspruchungen oder schwachen chemischen Beanspruchungen ausgesetzt sind, sowie für Betone mit hohem Wassereindringwiderstand.

Mit dieser pragmatischen Lösung wird unter anderem der Tatsache Rechnung getragen, dass zur Dauerhaftigkeit von Rezyklatbetonen bisher nur wenige, schlüssige Ergebnisse vorliegen. Beispielsweise sind in Bezug auf die Carbonatisierung die in der Literatur genannten Ergebnisse sehr unterschiedlich. Es werden sowohl keine Veränderungen als auch höhere Carbonatisierungstiefen gemessen. Im Folgenden sind dafür zwei Beispiele aus der Literatur [49][43] dargestellt:

- » In Abbildung 12 ist die Carbonatisierungstiefe von Rezyklatbetonen, die grobe und zum Teil auch feine rezyklierte Gesteinskörnungen enthielten, im Vergleich zu Beton aus natürlichen Gesteinskörnungen dargestellt. Die Rezyklate wurden aus drei Monate alten Betonen verschiedener Festigkeitsklassen hergestellt.
- » In Abbildung 13 ist die Carbonatisierungstiefe von Rezyklatbetonen dargestellt, die rezyklierte Gesteinskörnungen enthielten, die aus dem Abbruch einer alten Schleuse stammten.

Der aus den definierten, jungen Rezyklaten hergestellte Rezyklatbeton zeigt gegenüber dem Referenzbeton keine veränderte Carbonatisierungstiefe. Dagegen sind die Carbonatisierungstiefen des Rezyklatbetons aus dem Abbruchmaterial der Schleusen gegenüber dem Referenzbeton deutlich erhöht.

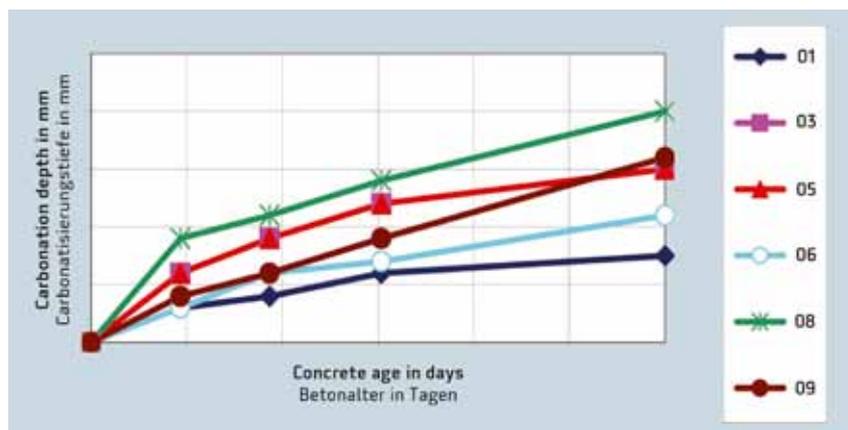


Figure: Bödefeld, Reschke

**13**  
Carbonation depth of concretes containing recycled aggregates produced from concrete rubble [43]. 01: reference; 03: CEM I, 75 m.-% RC 2/32 mm; 05: CEM III/A, 75 m.-% RC 2/32 mm; 06: CEM I, 75 m.-% RC 2/32 mm + 12.5 m.-% RC 0/2 mm; 08: CEM III/A, 75 m.-% RC 2/32 mm + 12.5 m.-% RC 0/2 mm; 09: CEM I, 75 m.-% RC 2/32 mm + 25 m.-% RC 0/2 mm

Carbonatisierungstiefe von Betonen aus rezyklierten Gesteinskörnungen, hergestellt aus Betonbruch [43]. 01: Referenz; 03: CEM I, 75 Ma.-% RC 2/32 mm; 05: CEM III/A, 75 Ma.-% RC 2/32 mm; 06: CEM I, 75 Ma.-% RC 2/32 mm + 12,5 Ma.-% RC 0/2 mm; 08: CEM III/A 75 Ma.-% RC 2/32 mm + 12,5 Ma.-% RC 0/2 mm; 09: CEM I, 75 Ma.-% RC 2/32 mm + 25 Ma.-% RC 0/2 mm

When trying to explain these differences, the factors that influence carbonation depth can be considered. In simplified terms, the carbonation depth of recycled-aggregate concrete is affected by two counteracting factors: the introduction of further constituents capable of carbonation slows down the process while the additional capillary porosity caused by the old cement paste accelerates carbonation. This assumption explains the inconsistent results, permitting the conclusion that the parameters previously used to characterize recycled aggregates with respect to carbonation are insufficient because the cement paste content and its phase composition are not determined. Appropriate substitute parameters that are easy to determine would have to be identified to arrive at these additional findings.

**Freeze/thaw resistance**

As regards freeze/thaw resistance, there is agreement in the literature that recycled aggregates usually exhibit a lower freeze/thaw resistance than natural aggregates whereas concretes containing such recycled aggregates are frost-resistant nonetheless.

This lower freeze/thaw resistance is attributed to the higher degree of water absorption and lower strength of the recycled-aggregate particles, which is why the particles are not capable of resisting the ice pressure occurring during freeze/thaw tests. This situation results in an increased degree of spalling.

Recycled-aggregate concretes usually exhibit a sufficient degree of freeze/thaw resistance. A number of experimental tests carried out to determine freeze/thaw resistance showed that the freeze/thaw resistance parameters of recycled-aggregate concretes were significantly better than those of the reference concretes containing natural aggregates. However, certain limitations were revealed when both coarse and fine aggregates were replaced with recycled aggregates. A significant deterioration was found for some of the concretes containing recycled sand. It is thus advisable to replace recycled sand with natural sand to produce a recycled-aggregate concrete with freeze/thaw parameters equivalent to natural-aggregate concrete.

Higher brick ratios lead to an additional improvement because they promote the formation of pores (similar to air-entraining agents), thus creating voids into which the water can expand during freezing.

Bei einer möglichen Erklärung der Unterschiede kann von den Einflussgrößen auf die Carbonatisierungstiefe ausgegangen werden. Vereinfachend betrachtet, wird das Carbonatisierungsverhalten von Rezyklatbetonen von zwei, in entgegengesetzte Richtungen wirkenden Faktoren beeinflusst: Der Eintrag zusätzlicher carbonisierungsfähiger Bestandteile führt zu einer Verlangsamung, die zusätzliche, durch den alten Zementstein verursachte Kapillarporosität zu einer Beschleunigung der Carbonatisierung. Mit dieser Hypothese können die gegensätzlichen Ergebnisse erklärt werden. Daraus folgt, dass die bisher für die Charakterisierung von Rezyklaten verwendeten Parameter in Bezug auf die Carbonatisierung nicht ausreichen, weil keine Aussagen zum Zementsteingehalt und dessen Phasenzusammensetzung gemacht werden. Für diese zusätzlich benötigten Aussagen müssten geeignete, einfach bestimmbare Ersatzkenngrößen gefunden werden.

**Frostbeständigkeit**

Zum Frostwiderstand wird in der Fachliteratur übereinstimmend die Meinung vertreten, dass rezyklierte Gesteinskörnungen in der Regel einen geringeren Widerstand gegen Frostbeanspruchungen aufweisen als natürliche Gesteinskörnungen, die daraus hergestellten Betone aber trotzdem frostbeständig sind.

Als Ursachen für den geringen Frostwiderstand der rezyklierten Gesteinskörnungen werden die höhere Wasseraufnahme und die geringere Kornfestigkeit der Rezyklatkörner genannt. Dadurch können die Körner dem bei den Frostprüfungen auftretenden Eisdruck nicht standhalten. Erhöhte Werte für die Absplitterungen sind die Folge.

Die Frostbeständigkeit von Rezyklatbetonen ist in der Regel gegeben. Eine Reihe der zur Frostbeständigkeit durchgeführten experimentellen Untersuchungen führte zu dem Ergebnis, dass die Frostwiderstände der Rezyklatbetone deutlich höher als die der Vergleichsbetone aus natürlichen Gesteinskörnungen waren. Einschränkungen ergaben sich, wenn grobe und feine Gesteinskörnungen durch Rezyklate ersetzt wurden. Bei der Verwendung von rezyklierten Sanden traten zum Teil deutliche Verschlechterungen auf. Um einen Beton aus rezyklierten Gesteinskörnungen herzustellen, der einem Beton mit natürlichen Gesteinskörnungen beim Frostwiderstand gleichwertig ist, wird deshalb der Austausch von RC-Sand gegen natürlichen Sand empfohlen.

Höhere Ziegelanteile führen zu einer weiteren Verbesserung, weil sie ähnlich wie Luftporenbildner die Porenbildung fördern und so Hohlräume schaffen, in die sich das Wasser beim Gefrieren ausdehnen kann.

**Alkali-Kieselsäure-Reaktion**

Zum Reaktionspotenzial von Rezyklaten bei der Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR) ist bisher wenig veröffentlicht worden. Die Frage, ob rezyklierte Gesteinskörnungen aus Betonen, die AKR-reaktive Gesteinskörnungen enthielten, noch reaktive Potenziale aufweisen, die zu Schäden des Rezyklatbetons führen können, ist nicht eindeutig zu beantworten. So zeigt das Beispiel von [50] in **Abbildung 14** die an Betonprismen 40 x 40 x 285 mm gemessenen Dehnungen des Ausgangsbetons, der unter

# ZKG SPECIAL 2013

## DRYMIX MORTAR / CONSTRUCTION CHEMISTRY

### LEARN MORE ABOUT:

- // raw materials
- // additives and compositions
- // modern plant equipment
- // international markets
- // sustainability aspects
- // functional building materials
- // efficient blending
- // storage, conveying and dispatch technology

Preorder your personal free copy of our ZKG Special and send an email to [drymix@bauverlag.de](mailto:drymix@bauverlag.de)

To place an ad, please contact our advertising manager  
Christian Reinke  
[christian.reinke@bauverlag.de](mailto:christian.reinke@bauverlag.de)

Advertising  
closing date:  
**21.08.2013**

Publishing date:  
**11.09.2013**

**ZKG**  
INTERNATIONAL

Expansion of concrete prisms containing recycled aggregates produced from concretes that contained alkali-reactive aggregates [50]. Aggregates; spratt: alkali-reactive siliceous lime; coarse RCA: coarse recycled aggregates from concretes containing alkali-reactive aggregates; fine RCA: fine recycled aggregates from concretes containing alkali-reactive aggregates

Expansion von Betonprismen aus rezyklierten Gesteinskörnungen, hergestellt aus Betonen, die alkalireaktive Gesteinskörnungen enthielten [50]. Gesteinskörnungen; Spratt: alkalireaktiver Kieselkalk; Coarse RCA: grobe Rezyklate aus Betonen mit alkalireaktiven Gesteinskörnungen; Fine RCA: feine Rezyklate aus Betonen mit alkalireaktiven Gesteinskörnungen

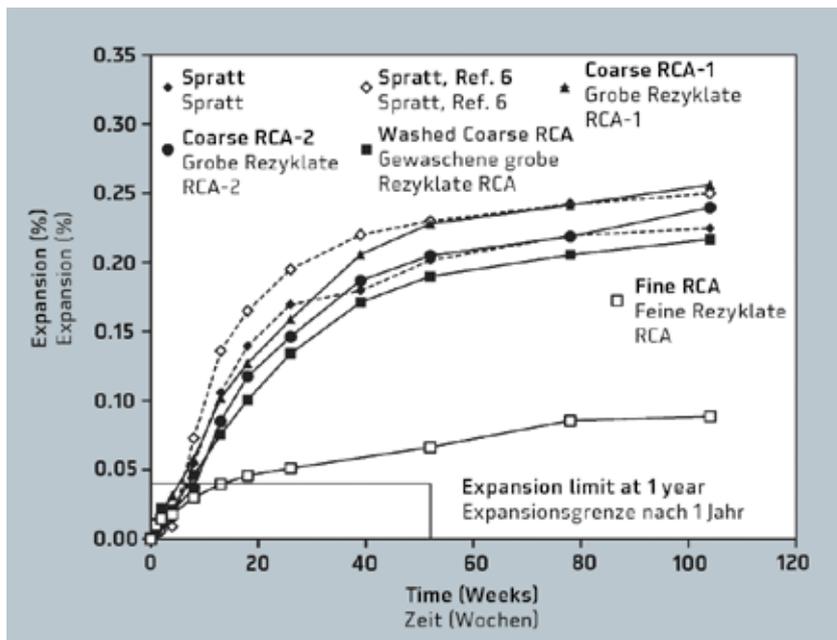


Figure: Cement and Concrete Research

**Alkali-silica reaction**

To date, there is only little evidence in the literature regarding the reactivity of recycled aggregates in the context of the alkali-silica reaction (ASR). There is no clear answer to the question of whether recycled aggregates taken from concretes that contained ASR-reactive aggregates continue to exhibit reactive potentials that may cause damage to the recycled-aggregate concrete. For instance, the example from [50] shown in Figure 14 illustrates the strains of the original concrete produced with alkali-reactive aggregates. These strains were measured on concrete prisms of 40 x 40 x 285 mm in size. The diagram also shows the strains of the concrete that contained recycled aggregates taken from the reprocessed original concrete. The original concrete had an age of twelve years at the time of its reprocessing and reuse. Measurements revealed virtually no differences. The reactivity of the aggregates used in these tests continues to cause considerable strains in second-generation concretes. The measured strains are lower if the prisms are produced from fine recycled aggregates, but they still exceed the permissible threshold.

In the second example taken from [51], the recycled-aggregate concrete produced from an old, severely damaged road pavement hardly revealed any strains. This permits the conclusion that its reactivity was fully utilized. Another recycled-aggregate concrete was produced using concrete from a demolished structure whose prior history was not known. This concrete reveals more considerable strains.

Even though we are unable to arrive at a clear conclusion, concretes damaged by an ASR should preventively be excluded from use as recycled materials. Under real-life conditions, however, it is virtually impossible to determine whether the produced recycled aggregate contains alkali-reactive aggregates if its origin can no longer be ascertained. For this reason, the alkali guideline applicable in Germany prescribes that recycled aggregates be tested to identify any alkali-reactive constituents that may originate from the pri-

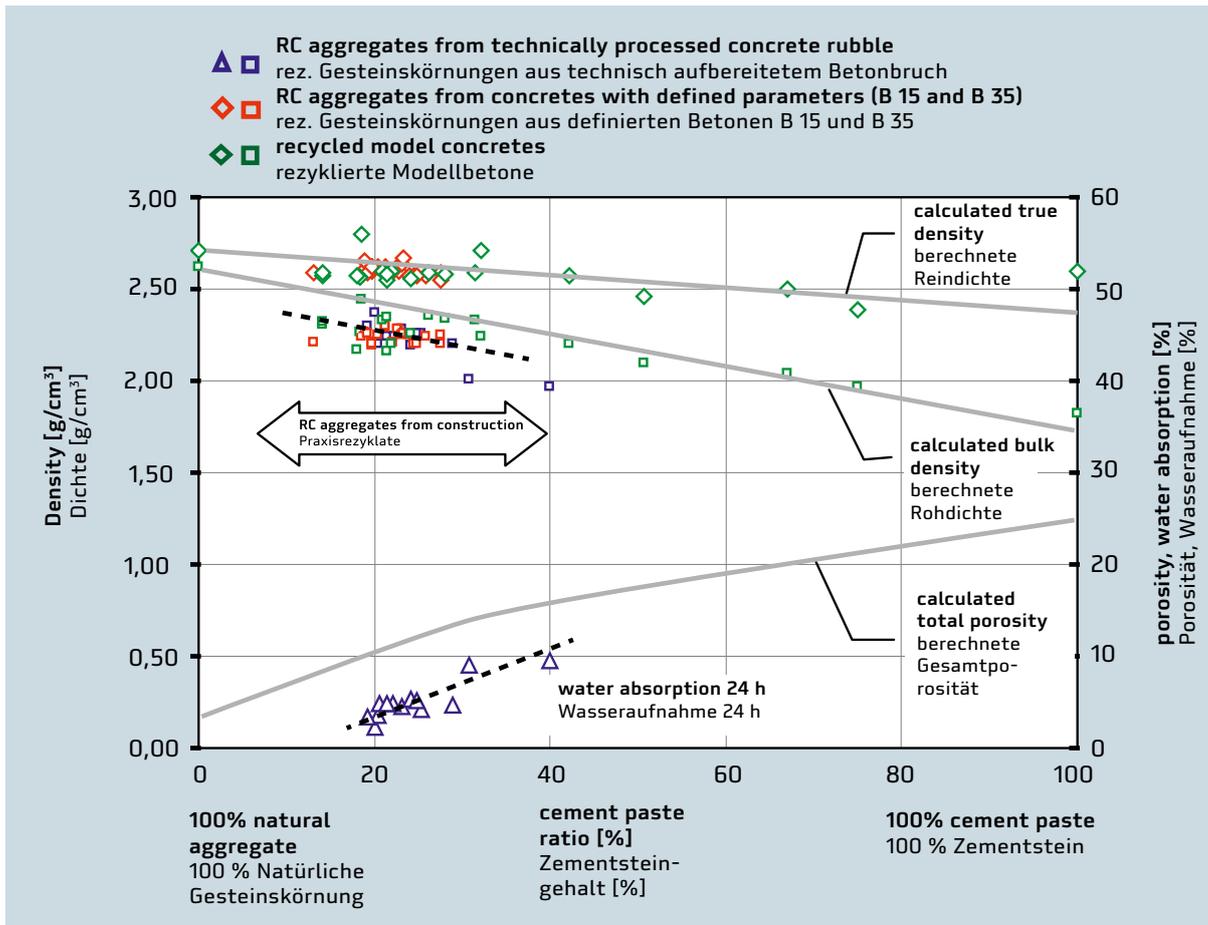
Verwendung alkalireaktiver Gesteinskörnungen hergestellt wurde. Ebenfalls dargestellt sind die Dehnungen des Rezyklatbetons, der den aufbereiteten Ausgangsbeton als rezyklierte Gesteinskörnung enthält. Der Ausgangsbeton war zum Zeitpunkt der Aufbereitung und Wiederverwertung zwölf Jahre alt. Es bestehen praktisch keine Unterschiede. Das reaktive Potenzial der hier verwendeten Gesteinskörnungen führt auch in den Betonen der zweiten Generation noch zu erheblichen Dehnungen. Werden die Prismen aus feinen, rezyklierten Gesteinskörnungen hergestellt, sind die gemessenen Dehnungen geringer. Sie liegen aber immer noch über dem zulässigen Grenzwert.

Im zweiten Beispiel nach [51] zeigt der aus altem, stark geschädigtem Fahrbahndeckenbeton hergestellte Rezyklatbeton kaum noch Dehnungen. Das Reaktionspotenzial scheint also aufgebraucht. Ein anderer Rezyklatbeton, der unter Verwendung von Abbruchbeton hergestellt wurde, dessen Vorgeschichte nicht bekannt war, weist höhere Dehnungen auf.

Auch wenn keine eindeutige Aussage getroffen werden kann, sollten durch AKR geschädigte Betone als Vorbeugemaßnahme vom Recycling ausgeschlossen werden. Allerdings kann unter Praxisbedingungen kaum erkannt werden, ob das hergestellte Rezyklat alkalempfindliche Gesteinskörnungen enthält, wenn die Herkunft nicht mehr genau geklärt werden kann. Deshalb fordert die in Deutschland gültige Alkalirichtlinie Untersuchungen der Rezyklate auf alkalempfindliche Bestandteile, die aus der primären Gesteinskörnung stammen können, und des Alkaligehalts.

**Sulfat-Angriff**

Um einen treibenden Angriff durch Sulfate auszuschließen, sind der Sulfatgehalt und der Gehalt an Gipspartikeln in rezyklierten Gesteinskörnungen strikt begrenzt. Trotzdem kann das Vorhandensein von Gipspartikeln nicht vollständig ausgeschlossen werden, weil die untersuchten Probemengen in der Regel nicht groß genug sind, um die Einhaltung der vorgegebenen, niedrigen Grenzwerte mit ausreichender statistischer Sicherheit zu gewährleisten.



Phase diagram for recycled aggregates (data for technically reprocessed recycled aggregates [56], recycled coarse aggregates from concretes with defined parameters [57], model concretes [28])

Zustandsdiagramm für rezyklierte Gesteinskörnungen (Daten für technisch aufbereitete rezyklierte Gesteinskörnungen [56], für rezyklierte grobe Gesteinskörnungen aus definierten Betonen [57], für Modellbetone [28])

mary mineral aggregate, and to determine their alkali content.

#### Sulfate attack

Both the sulfate content and the amount of gypsum particles contained in recycled aggregates are strictly limited to prevent expansive sulfate attack. Despite this precaution, the presence of gypsum particles cannot be excluded completely because the tested amounts are usually not large enough to ensure compliance with the prescribed low thresholds with sufficient statistical certainty.

At the fresh-concrete stage, gypsum may interfere with the hardening process. When the recycled aggregate concrete has hardened, the gypsum may react with the hydration products of both the new and the old cement paste. For example, the calcium aluminate monosulfate may be converted to trisulfate, which is associated with a 2.3 fold volume increase. Also, calcium aluminate hydrate may be converted to ettringite, resulting in a 4.8 fold volume increase. Both reactions lead to damage to the concrete by expansion phenomena.

#### 4 Approaches to modeling recycled-aggregate concrete

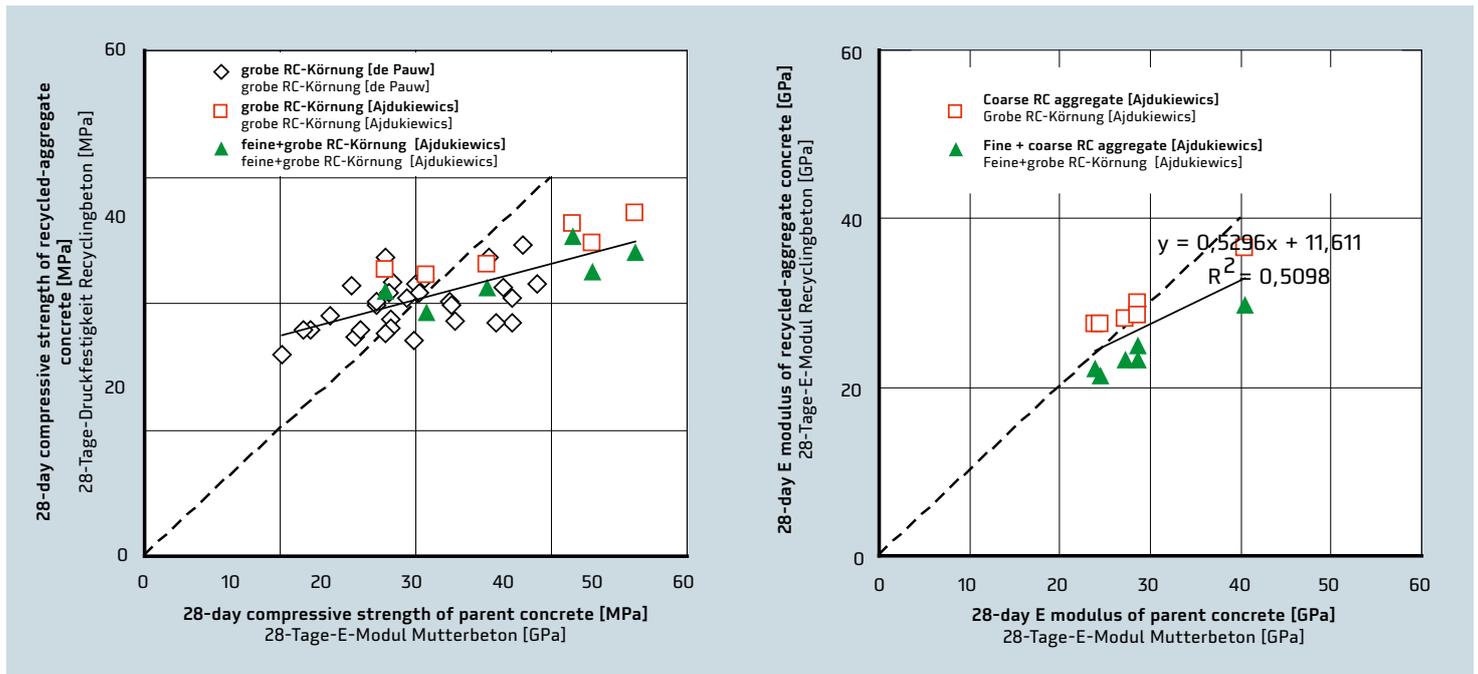
In the case of standard concrete, we can apply a simplified approach assuming that its strength depends on its main constituents, i.e. aggregates and cement paste, and on the interfacial area that is formed between them. The number of influential parameters is significantly larger for concrete containing recycled aggregates. A distinction can be made between influences of

Im Stadium des Frischbetons kann der Gips zu Störungen des Erstarrens führen. Im erhärteten Zustand des Rezyklatbetons kann der Gips mit den Hydratationsprodukten des neuen, aber auch des alten Zementsteins reagieren. So kann es beispielsweise zu einer Umwandlung von Calciumaluminatmonosulfat in Trisulfat kommen, die mit einer Volumenvergrößerung von 2,3 verbunden ist. Möglich ist auch die Umwandlung von Calciumaluminat-hydrat zu Ettringit mit einer 4,8-fachen Volumenzunahme. Beides führt zu Betonschäden durch Treiberscheinungen.

#### 4 Ansätze für eine Modellierung von Rezyklatbeton

Für Normalbeton kann vereinfacht davon ausgegangen werden, dass die Festigkeit von den Hauptkomponenten Gesteinskörnung und Zementstein sowie von der sich zwischen ihnen ausbildenden Phasengrenzfläche abhängt. Bei Beton, der rezyklierte Gesteinskörnungen enthält, ist die Anzahl der Einflussgrößen deutlich höher. Unterschieden werden kann zwischen den Einflüssen der Rezyklate aus den ursprünglichen Gesteinskörnungen und dem Altbetonzementstein, der sie zu Agglomeraten verbindet beziehungsweise ihre Oberfläche bedeckt, sowie den Einflüssen der neuen Gesteinskörnung und dem die Erhärtung bewirkenden aktiven Zementstein. Die Anzahl der Phasengrenzflächen nimmt rechnerisch auf sechs zu, wenn die Ausbildung einer solchen zwischen allen Komponenten angenommen wird.

Einen ersten Beitrag, einen Rezyklatbeton als Mehrphasenmaterial zu modellieren, hat Jianzhuang Xiao mit einer FEM-Simulation der Chloriddiffusion vorgelegt [52]. Dabei wird Rezyklatbeton als Fünf-Phasen-Kompo-



**16**  
**Dependence of mechanical properties of the recycled-aggregate concrete on the characteristics of the original concrete [44] [58]**

Abhängigkeit der mechanischen Eigenschaften des Rezyklatbetons von den Eigenschaften des Ausgangsbetons [44] [58]

the recycled aggregates that stem from the original aggregates and the old cement paste, which causes them to form clusters or covers their surface, and influences of the new aggregates and of the active cement paste that triggers concrete hardening. The number of interfacial areas increases to six if we assume that such areas are formed between all of the components.

Jianzhuang Xiao carried out an FEM simulation of chloride diffusion [52] and thus made one of the first contributions toward establishing a multi-phase material model of a recycled-aggregate concrete. In this model, the recycled-aggregate concrete is considered to be a five-phase composite. The old and the new interfacial areas represent the so-called “interphases”. The old and the new mortar and the original aggregates form the “continuous phases”. The outcomes of the FEM simulation are highly consistent with the results arrived at in the theoretical calculation of chloride diffusion. These findings were not compared with measured values.

**Characterization of aggregates**

To date, the mechanical properties of recycled-aggregate concretes have been primarily modeled on the basis of statistical methods [53] [54] [55]. No phenomenological models were described that were derived from the interactions of the individual composite constituents contained in the recycled-aggregate concrete. A stepwise approach is necessary to first develop an understanding of these interactions:

- » In the first step, the recycled aggregates must be clearly characterized.
- » In the second step, correlations between the characteristic features of the recycled aggregates and the mechanical properties of the concretes produced with these aggregates need to be identified.
- » In addition, the influence of the new aggregates and of the active cement paste causing concrete hardening on these correlations needs to be considered.

sit betrachtet. Die alte und die neue Phasengrenzfläche stellen die „interphases“ dar. Der alte und der neue Mörtel sowie die ursprünglichen Gesteinskörnungen bilden die „continuous phases“. Die Ergebnisse der FEM-Simulation stimmen gut mit den Ergebnissen überein, die aus theoretischen Gleichungen für die Chloriddiffusion berechnet werden. Eine Gegenüberstellung mit Messwerten wird nicht vorgenommen.

**Charakterisierung der Gesteinskörnung**

Modellierungen von Rezyklatbeton in Bezug auf die mechanischen Eigenschaften wurden bisher überwiegend unter Nutzung statistischer Methoden durchgeführt [53] [54][55]. Phänomenologische Modelle, die aus dem Zusammenwirken der verschiedenen Kompositbestandteile im Rezyklatbeton abgeleitet werden, sind nicht beschrieben. Um zunächst dieses Zusammenwirken zu verstehen, ist ein schrittweises Vorgehen erforderlich:

- » Zunächst müssen die rezyklierten Gesteinskörnungen eindeutig charakterisiert werden.
- » Im zweiten Schritt müssen Korrelationen zwischen den charakteristischen Merkmalen der rezyklierten Gesteinskörnungen und den mechanischen Eigenschaften der daraus hergestellten Betone gefunden werden.
- » Des Weiteren muss der Einfluss der neuen Gesteinskörnung und des aktiven Zementsteins, der die Erhärtung bewirkt, auf die Korrelationen berücksichtigt werden.

**Zementsteingehalt und physikalische Eigenschaften**

Die Charakterisierung von rezyklierten Gesteinskörnungen als erstem Baustein eines Modells beruht auf dem Umstand, dass diese aus der ursprünglichen Gesteinskörnung und dem Zementstein bestehen (s. Abb. 3), wenn sie durch eine traditionelle Aufbereitung aus Altbeton erzeugt wurden. Sie können unter Vernachlässigung der Phasengrenzfläche als Zweistoffsystem betrachtet werden, in dem natürliche Gesteinskörnungen einerseits und Zementstein andererseits die Endpunkte einer Mi-

### Cement paste content and physical characteristics

The characterization of recycled aggregates as the first building block of a model is derived from the fact that these aggregates consist of the original aggregate and the cement paste (see Fig. 3) if they are extracted from old concrete in a conventional reprocessing step. Neglecting the interfacial area, these aggregates can be considered to be a binary system in which natural aggregates and cement paste constitute the two endpoints of a mixing series. The physical parameters of the endpoints can be used to derive a simplified phase diagram for the relevant characteristics by calculating the bulk and true densities across the mixing series, applying the values for pure natural aggregates and pure cement paste to Equation 1.

$$\rho_{RC} = \frac{\rho_{ZS} \cdot \rho_{GK}}{a_{ZS} \cdot \rho_{GK} \cdot a_{GK} \cdot \rho_{ZS}}$$

Figure 15 shows a comparison of the calculated changes in bulk and true densities and overall porosity with the corresponding measured values, which were determined for technically reprocessed recycled aggregates, recycled aggregates from concretes with defined parameters and model concretes with graded cement paste ratios. The measured values largely support the curve derived from the mix calculation.

The cement paste ratios of recycled building materials produced from reprocessed concrete rubble range from about 10 to 40 m.-%. These findings alone result in a wide range of physical characteristics, i.e. 2.4 to 2.1 g/cm<sup>3</sup> for bulk density and 0.6 to 9.8% for water absorption.

In the literature, recycled aggregates are described as composites consisting of mortar (which comprises the cement paste and the fine aggregate) and coarse aggregates. The measurements performed by Abbas [25] revealed mortar ratios ranging from 21 to 43 m.-%. De Juan [24] states mortar contents between 33 and 55 m.-% for the 4-8 mm aggregate size and between 23 and 44 m.-% for the 8-16 mm size. According to the definition, the mortar ratios should be significantly higher than the cement paste ratios, as demonstrated by the values established by de Juan. This author also proved that important physical characteristics of recycled aggregates correlate with the mortar ratio.

### Mechanical properties of concretes

The second building block of the modeling exercise is to identify a correlation between the characteristics of the recycled aggregates and the mechanical properties of the concretes containing them. Influential parameters include the amount of old cement paste but also the type of the original aggregate and the strength of the concrete from which the recycled aggregates were produced.

The findings established by Ajdukiewicz [44] and de Pauw [58] were analyzed to determine the way in which the strength or the modulus of elasticity of the "parent" concrete influence the corresponding characteristics of the recycled-aggregate concrete. Figure 16 summarizes the influence of strength in the diagram

schungsreihe darstellen. Aus den physikalischen Parametern der Endpunkte kann vereinfachend ein Zustandsdiagramm für die relevanten Eigenschaften entwickelt werden, indem die Roh- und Reindichten entlang der Mischungsreihe aus den Werten für reine natürliche Gesteinskörnungen und reinen Zementstein nach der Gleichung 1 berechnet werden.

$$\rho_{RC} = \frac{\rho_{ZS} \cdot \rho_{GK}}{a_{ZS} \cdot \rho_{GK} \cdot a_{GK} \cdot \rho_{ZS}}$$



#### Equation 1

a<sub>ZS</sub>, a<sub>GK</sub> – ratios of cement paste and natural aggregate; ρ<sub>ZS</sub>, ρ<sub>GK</sub> – densities of cement paste and natural aggregate

a<sub>ZS</sub>, a<sub>GK</sub> – Anteile an Zementstein und natürlicher Gesteinskörnung; ρ<sub>ZS</sub>, ρ<sub>GK</sub> – Dichten von Zementstein und natürlicher Gesteinskörnung

In Abbildung 15 sind die berechneten Änderungen von Reindichte, Rohdichte und Gesamtporosität den entsprechenden Messwerten gegenübergestellt – ermittelt an technisch hergestellten Rezyklaten, an rezyklierten Gesteinskörnungen aus definierten Betonen und an Modellbetonen mit abgestuften Zementsteingehalten. Die Messwerte bestätigen in etwa den aus der Mischungsrechnung hervorgegangenen Verlauf.

Die Zementsteingehalte von RC-Baustoffen aus aufbereitetem Betonbruch bewegen sich zwischen rund 10 bis rund 40 Masse-%. Bereits daraus ergibt sich eine beträchtliche Spannweite der physikalischen Eigenschaften von 2,4 bis 2,1 g/cm<sup>3</sup> für die Rohdichte und 0,6 bis 9,8 % für die Wasseraufnahme.

In der Literatur werden rezyklierte Gesteinskörnungen beschrieben als Komposite aus Mörtel, der den Zementstein und die feinen Gesteinskörnungen umfasst, und groben Gesteinskörnungen. Die Mörtelgehalte liegen nach den Messungen von Abbas [25] zwischen 21 und 43 Masse-%. De Juan [24] gibt Mörtelgehalte an zwischen 33 und 55 Masse-% für die Fraktion 4/8 mm sowie zwischen 23 und 44 Masse-% für die Fraktion 8/16 mm an. Nach der Definition sollten die Mörtelgehalte deutlich über den Zementsteingehalten liegen, wie es bei den Werten von de Juan der Fall ist. Von ihr wurde auch nachgewiesen, dass wichtige physikalische Eigenschaften von rezyklierten Gesteinskörnungen mit dem Mörtelgehalt korrelieren.

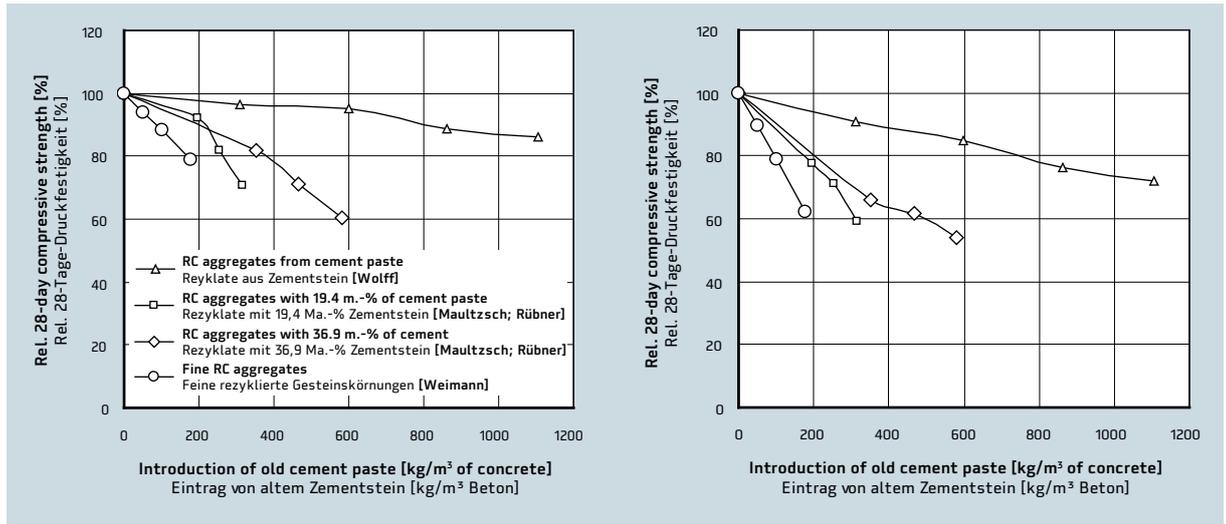
### Mechanische Eigenschaften der Betone

Der zweite Baustein in Richtung Modellierung besteht darin, eine Korrelation zwischen den Merkmalen der rezyklierten Gesteinskörnungen und den mechanischen Eigenschaften der daraus hergestellten Betone zu ermitteln. Neben dem Gehalt an altem Zementstein stellen die Art der ursprünglichen Gesteinskörnung und die Festigkeit des Betons, aus dem die Rezyklate hergestellt wurden, Einflussgrößen dar.

Um zu ermitteln, wie die Festigkeit beziehungsweise der E-Modul des „Mutterbetons“ die entsprechenden Eigenschaften des Rezyklatbetons beeinflussen, wurden Ergebnisse von Ajdukiewicz [44] und de Pauw [58] ausgewertet. In Abbildung 16 ist im linken Diagramm der Einfluss der Festigkeit zusammengefasst. Der Wertebereich für die Festigkeit der Ausgangsbetone erstreckte sich von 20 bis 70 MPa. Die daraus erzeugten Recyclingbetone wiesen Festigkeiten von 30 bis 50 MPa auf. Übereinstimmend ergibt sich, dass die Festigkeit des Mutterbetons eher moderate Auswirkungen auf die Fes-

Dependence of relative compressive strength and modulus of elasticity of recycled-aggregate concretes on the amount of old cement paste introduced into the concrete mix [28] [27] [59] [60]

Abhängigkeit der relativen Druckfestigkeiten und der E-Moduli von Rezyklatbetonen von der eingetragenen Menge an altem Zementstein in die Betonmischung [28][27][59][60]



on the left-hand side. The strength values of the original concretes ranged from 20 to 70 MPa. The derived recycled-aggregate concretes revealed strengths ranging from 30 to 50 MPa. There is consistent evidence that the strength of the parent concrete has a rather moderate effect on the strength of the derived recycled-aggregate concrete. It was found that recycled-aggregate concrete derived from a low-strength concrete can achieve or even exceed the strength of the original concrete. This may be due to the fact that the crushing process releases a major portion of the aggregate particles from their weak bond that includes only a low amount of cement paste. If, as in the present case, only the coarse portion of the recycled aggregates is used for producing the recycled-aggregate concrete, only a minor amount of old cement paste is introduced that may cause a decrease in strength. If a higher-strength concrete is used as the basis to produce the recycled aggregates, a higher amount of cement paste will remain linked to the aggregate after reprocessing and is subsequently introduced into the concrete, which results in a decrease in strength compared to the parent concrete.

**Modulus of elasticity**

The modulus of elasticity of the parent and recycled-aggregate concrete also reveals a certain attenuation of the influence but the original concrete is not “overtaken” by the recycled-aggregate concrete. However, the certainty of this conclusion is weakened because only a few measured values were available.

Tests were carried out on three levels to determine the influence of the old cement paste content on both strength and modulus of elasticity:

- » First, a simplified approach was used to replicate recycled aggregates as mixtures of natural aggregates and pure cement paste. This method is associated with a high degree of abstraction because there is no connection between the two constituents of the composite.
- » Second, two coarse recycled aggregates were used whose cement paste ratios differed from each other. This method resulted in the introduction of a varying amount of cement paste whereas the recycled-aggregate ratio remained identical.

tigkeiten des daraus hergestellten Rezyklatbetons hat. So kann Rezyklatbeton aus geringstem Beton durchaus die Festigkeit des ursprünglichen Betons erreichen oder sogar überschreiten. Die Ursache kann darin liegen, dass durch die Zerkleinerung ein großer Anteil der Gesteinskörnungen aus ihrem schwachen, zementsteinarmen Verbund freigelegt wird. Wenn für die Herstellung des Rezyklatbetons – wie hier der Fall – nur die groben Rezyklate verwendet werden, ist der Eintrag von Altzementstein gering, von dem ein Festigkeitsrückgang ausgehen kann. Ist ein festerer Beton die Grundlage der Rezyklatherstellung, wird nach der Aufbereitung mehr Zementstein an der Gesteinskörnung verbleiben und in den Beton eingetragen. Ein Festigkeitsrückgang gegenüber dem Ausgangsbeton ist die Folge.

**E-Modul**

Bei den E-Moduli von Mutter- und Rezyklatbeton ergibt sich ebenfalls eine Einflussdämpfung, aber kein „Überholen“ des Ausgangsbetons durch den Rezyklatbeton. Allerdings waren hier nur wenige Messwerte verfügbar, was die Sicherheit der Aussage schmälert.

Um den Einfluss des Gehalts an altem Zementstein auf die Festigkeit und den E-Modul zu ermitteln, wurden Versuche auf drei Ebenen durchgeführt:

- » Zum einen wurden rezyklierte Gesteinskörnungen vereinfacht als Mischungen aus natürlichen Gesteinskörnungen und reinem Zementstein nachgebildet. Dieses Vorgehen stellt eine starke Abstraktion dar, weil beide Kompositbestandteile nicht verbunden sind.
- » Zum anderen wurden zwei grobe Betonrezyklate verwendet, deren Zementsteingehalte unterschiedlich hoch waren. Dadurch war der Zementsteineintrag bei gleichem Rezyklatanteil unterschiedlich.
- » Als dritte Variante wurde Brechsand als zementsteinhaltige feine Komponente verwendet und in unterschiedlichen Anteilen zugegeben.

Sowohl aus den abstrahierten als auch den tatsächlichen Rezyklaten wurden Betone mit abgestuften Gehalten an groben Gesteinskörnungen hergestellt.

Die Ergebnisse in **Abbildung 17** zeigen, dass die Eigenschaften der Sekundärbetone aus den Rezyklaten mit den unterschiedlichen Zementsteingehalten relativ

» Third, crushed sand was used as a fine component containing cement paste, and added in varying amounts.

Both the modeled and the actual recycled aggregates were used to produce concretes with graded coarse aggregate ratios.

The results shown in **Figure 17** demonstrate that the characteristics of the secondary concretes consisting of recycled aggregates with varying cement paste ratios are relatively close to each other. These considerations permit the conclusion that the cement paste content appears to be one of the main influential parameters. The concretes that contained pure cement paste and the concretes produced with fine recycled aggregates revealed considerable differences, which may have been caused by interfacial phenomena. The concrete containing pure cement paste was lacking the interfacial area between the original aggregate and the old cement paste. The concrete produced from fine recycled aggregates exhibited a particularly strong interfacial area between the recycled aggregates and the new cement paste.

#### New aggregate and active cement paste

In the third step of phenomenological modeling, the influences of secondary concrete production need to be integrated as a further building block of the model, relying on correlations such as the generally established water/cement ratio principle.

nah beieinanderliegen. Damit scheint der Zementstein-gehalt tatsächlich eine Haupteinflussgröße zu sein. Die Betone, die reinen Zementstein enthielten beziehungsweise die Betone, die unter Verwendung von feinen rezyklierten Gesteinskörnungen hergestellt wurden, weichen deutlich ab. Für diese Unterschiede könnten Grenzflächenphänomene verantwortlich sein. Im Fall des Betons, der reinen Zementstein enthielt, fehlt die Grenzfläche zwischen ursprünglicher Gesteinskörnung und altem Zementstein. Im Fall des Betons aus den feinen rezyklierten Gesteinskörnungen ist die Grenzfläche zwischen den Rezyklaten und dem neuen Zementstein besonders hoch.

#### Neue Gesteinskörnung und aktiver Zementstein

Im dritten Schritt der phänomenologischen Modellierung sind die Einflüsse aus der Sekundärbetonherstellung als Baustein zu integrieren. Hier können Zusammenhänge wie das bekannte Wasserzementwert-Gesetz genutzt werden.

Mit den vorgeschlagenen Bausteinen und ihrer Verknüpfung ist es gegebenenfalls möglich, die mechanischen Eigenschaften besser abzuschätzen. In Bezug auf die Dauerhaftigkeit sind die angestellten Überlegungen noch nicht ausreichend. So bezieht sich das Zustandsdiagramm in **Abbildung 15** nur auf die wichtigsten physikalischen Eigenschaften. Zusätzlich dazu unterscheiden sich die Endpunkte der Mischungsreihe in ihrer chemischen und mineralogischen Zusammensetzung sowie in der Reaktivität. Anforderungsgerechte, natürliche Ge-



# BETOCARB®

Our Minerals Your Advantage

Innovative solutions for complex issues.

Omya is a global producer of calcium carbonate. With over 120 years experience in mineral sourcing and production Omya's knowledge of ultrafine calcium carbonate and its use in concrete applications are unparalleled. Omya's Applied Technology Services will help you to improve your performance. We understand your needs. Worldwide.



[www.omya.com](http://www.omya.com)  
[info.construction@omya.com](mailto:info.construction@omya.com)

If required, the proposed building blocks and their linkage enable better estimates of the mechanical properties. The considerations described above are still insufficient with respect to durability. For example, the phase diagram shown in **Figure 15** only includes the most important physical characteristics. Furthermore, the endpoints of the mixing series differ in their chemical and mineralogical compositions and in their reactivity. Natural aggregates that meet the specifications usually consist of silica and feldspar, or of calcite. They are inert. The cement paste present in recycled aggregates contains portlandite, C-S-H phases and calcium sulfoaluminates; it may also contain unhydrated cement particles and other phases. These constituents may react with water, carbon dioxide, sulfate etc. Any appropriate durability assessment thus requires a thorough description of the chemical composition.

### 5 The future of recycling

Recycling as the re-introduction of used products and materials into the material cycle is not a phenomenon of our times. Rather, the recourse to older materials can be demonstrated for most preserved buildings or structures – from Antiquity to the Middle Ages. The significance of the recycling of building materials decreased only when the achievements of the industrial revolution enabled the large-scale production of building materials.

It is quite difficult to determine the point in time when “modern” building materials recycling began. We are currently seeing a transition: from mere demolition to dismantling and disassembly, from landfill to the reuse of building materials. Structures that are no longer required or that no longer meet the needs of their users or applicable technical specifications and standards are dismantled.

Today, we can at least say that the demolition, dismantling and reprocessing steps have become a necessary and accepted part of construction activity. Yet there are still reservations when it comes to the possible uses of recycled building materials.

#### Cycle for coarse aggregate sizes

Reprocessed concrete rubble may be reused for concrete production provided that compliance with applicable standards and regulations is ensured. Even if only such areas of use are envisaged for precautionary reasons that have no critical influence on durability, the total amount of coarse recycled aggregates from concrete rubble could be used for producing new concrete. While available recycled aggregates amount to approx. 20 million tonnes, the consumption of natural aggregates for concrete production is about ten times higher. This means that a closed cycle for the coarse portions of reprocessed concrete rubble would be possible.

To date, the fine sizes produced during the reprocessing of concrete rubble have been excluded from this cycle. However, these fines might be used as an additive in concrete production provided they are ground to the fineness of cement. According to own

steinskörnungen bestehen überwiegend aus Quarz und Feldspäten oder aus Calcit. Sie sind inert. Zementstein als Bestandteil von Rezyklaten enthält Portlandit, C-S-H-Phasen, Calciumsulfoaluminat, gegebenenfalls unhydratisierte Zementbestandteile und weitere Phasen. Diese Bestandteile können mit Wasser, CO<sub>2</sub>, Sulfat und so weiter reagieren. Die eindeutige chemische Zustandsbeschreibung ist für eine Einschätzung der Dauerhaftigkeit also unabdingbar.

### 5 Die Zukunft des Recyclings

Recycling als die Rückführung genutzter Produkte und Materialien in den Stoffkreislauf ist kein Phänomen unserer Zeit. Bei den meisten erhaltenen Bauwerken von der Antike bis zum Mittelalter kann der Rückgriff auf das Material älterer Bauwerke nachgewiesen werden. Erst nachdem die industrielle Revolution die Massenproduktion von Baustoffen ermöglichte, verlor das Baustoffrecycling seine Bedeutung.

Den Zeitpunkt des Beginns des „modernen“ Baustoffrecycling angeben zu wollen, ist sicher schwierig. Eine Wende vollzieht sich – vom Abbruch zum Rückbau und von der Deponierung von Bauabfällen zur Verwertung. Bauwerke, die nicht mehr benötigt werden, oder solche, die nicht mehr den Ansprüchen der Nutzer oder den technischen Anforderungen genügen, werden zurückgebaut.

Zumindest der Abbruch und Rückbau und die Aufbereitung sind mittlerweile notwendiger und akzeptierter Bestandteil des Baugeschehens. Beim Einsatz von Recycling-Baustoffen gibt es dagegen immer noch Vorbehalte.

#### Kreislauf für grobe Fraktionen

Der Wiedereinsatz von aufbereitetem Betonbruch für die Betonherstellung ist bei Einhaltung der gültigen Vorschriften möglich. Auch wenn vorsorglich nur solche Einsatzgebiete bedient werden, die die Dauerhaftigkeit nicht kritisch beeinflussen, könnte die gesamte Menge an groben, rezyklierten Gesteinskörnungen aus Betonbruch zur erneuten Betonherstellung verwendet werden. Dem Aufkommen an rezyklierten Gesteinskörnungen von rund 20 Mio. t steht ein Verbrauch an natürlichen Gesteinskörnungen für die Betonherstellung gegenüber, der etwa zehnmals höher ist. Ein geschlossener Kreislauf für die groben Fraktionen von aufbereitetem Betonbruch wäre also realisierbar.

Die feinen Fraktionen, die bei der Aufbereitung von Betonbruch entstehen, sind bisher von diesem Kreislauf ausgeschlossen. Nach einer Mahlung auf Zementfeinheit wäre eine Verwertung als Zusatzstoff bei der Betonherstellung möglich. Nach eigenen Untersuchungen lassen sich dadurch Einsparungen von Zement und Eigenschaftsverbesserungen erreichen [62].

Die bisher getroffenen Aussagen gelten für sortenreinen Beton. Betonbruch aus dem Abbruch von Bauwerken enthält in der Regel Nebenbestandteile. Diese Bestandteile müssen vor dem Einsatz als rezyklierte Gesteinskörnung entfernt werden. In anderen Sektoren der Sekundärrohstoffwirtschaft wie dem Kunststoff- und Glasrecycling kommen sensorgestützte Sortierverfahren zum Einsatz, mit denen die Partikel eines Haufwerks er-

investigations, this use would result in cement savings and improvements in the concrete performance characteristics [62].

The above considerations exclusively apply to pure-grade concrete. In contrast, concrete rubble that stems from the demolition of structures usually contains other, secondary constituents, which need to be removed prior to its use as a recycled aggregate. Other sectors of the recycling industry, such as plastics and glass, rely on sensor-based classifying processes that detect the individual particles of a bulk solid and separate them into various groups of materials. It would be necessary to develop such methods for concrete recycling, too.

#### Deriving more comprehensive quality criteria

The fact that recycled aggregates are composites consisting of cement paste and natural aggregates must be taken into account to gain a more thorough understanding of recycled-aggregate concretes. If these recycled aggregates are used for the production of new concrete, the secondary concrete will have a higher cement paste ratio. Its mechanical properties thus exhibit systematic alterations and more marked variations. The higher cement paste ratio also plays a key role with respect to durability because it leads to an increase in porosity. Water is required as a partner for most reactions that compromise durability; it may penetrate more easily into the concrete.

Other important influential parameters include the chemical condition of the old cement paste and of the original aggregates. For example, concrete of a very old age or recycled aggregates stored for a long period may have undergone complete carbonation, which is why they no longer contain hydration products. It is equally difficult to determine the reactivity of the original aggregates in an alkali-silica reaction.

Quality criteria need to be developed in a more thorough and comprehensive manner since our knowledge of the characteristics of recycled concrete aggregates and concretes produced with them continues to be insufficient. Statistical analyses are even more important than for natural-aggregate concrete.

The future of recycling is closely linked to current trends in the development of building materials. Concrete is a commodity building material that is relatively easy to recycle in its conventional composition. Future developments, however, may challenge this good recyclability. Relevant examples include the joining of concrete with other components to form composite elements, or certain new mix designs. In these cases, solutions are required that no longer rely on the material characteristics of concrete but utilize its potential as a raw material instead.

kannt und in Stoffgruppen getrennt werden können. Die Entwicklung solcher Verfahren auch für das Betonrecycling wäre ein notwendiger Schritt.

#### Ableitung von Qualitätskriterien vertiefen

Für das tiefere Verständnis von Betonen aus rezyklierten Zuschlägen muss beachtet werden, dass die Rezyklate Komposite aus Zementstein und natürlichen Gesteinskörnungen sind. Werden sie zur erneuten Betonherstellung eingesetzt, wird der Zementsteinanteil in den Sekundärbetonen erhöht. Bei den mechanischen Eigenschaften folgen daraus systematische Veränderungen und ein Anstieg der Schwankungsbreiten. Bei der Dauerhaftigkeit spielt der erhöhte Zementsteingehalt ebenfalls die entscheidende Rolle. Dadurch wird die Porosität erhöht. Wasser, das als Reaktionspartner benötigt wird für die meisten Reaktionen, die die Dauerhaftigkeit beeinträchtigen, kann leichter in den Beton eindringen.

Der chemische Zustand des Alzementsteins und der ursprünglichen Gesteinskörnungen werden ebenfalls wichtige Einflussgrößen darstellen. So kann bei sehr altem Beton oder sehr lange gelagerten Betonrezyklaten eine vollständige Carbonatisierung stattgefunden haben, sodass keine Hydratationsprodukte mehr vorhanden sind. Ebenso schwierig einzuschätzen ist das Reaktionspotenzial der ursprünglichen Gesteinskörnungen in der Alkali-Kieselsäure-Reaktion.

Da die Kenntnisse über die Charakteristika von Betonrezyklaten und den daraus hergestellten Betonen noch nicht ausreichend sind, muss die Ableitung von Qualitätskriterien fortgesetzt und vertieft werden. Statistische Betrachtungen sind noch wichtiger als bei Betonen aus natürlichen Gesteinskörnungen.

Die Zukunft des Recyclings hängt stark mit der Gegenwart der Baustoffentwicklung zusammen. Für den traditionellen Massenbaustoff Beton, der an sich gut rezyklierbar ist, kann diese gute Rezyklierbarkeit durch Weiterentwicklungen in Frage gestellt werden. Beispiele dafür sind das Zusammenfügen mit weiteren Komponenten zu Verbundelementen oder bestimmte Rezepturenentwicklungen. Dann sind Lösungsansätze erforderlich, die nicht mehr auf den Werkstoffeigenschaften des Betons aufbauen, sondern sein Rohstoffpotenzial nutzen.



Prof. Dr.-Ing. habil. Anette Müller; IAB - Institute for Applied Construction Research, Weimar  
Born in 1946; studied construction engineering at HAB Weimar from 1964 to 1968; obtained doctorate in 1974; obtained

postdoctoral professorship and research qualification in the field of cement chemistry in 1988; 1995-2011 professor for the processing and recycling of building materials at Bauhaus University Weimar; since 2011, associate at IAB Weimar with a focus on the recycling of building materials.



For the full list of References/Literature enter the Webcode into the search field on [www.bft-international.com](http://www.bft-international.com).

Webcode BHW3P1H3