

Katrin Severins, Christoph Müller, Düsseldorf

Brechsand als Hauptbestandteil im Zement^{*)}

Crushed sand as main constituent in cement^{*)}

1 Ziel des Vorhabens

Zemente mit mehreren Hauptbestandteilen bieten durch den effizienten Einsatz des Portlandzementklinkers eine Möglichkeit, die CO₂-Emissionen bei der Herstellung von Zement zu senken. Sollen Zemente mit mehreren Hauptbestandteilen in Beton nach DIN EN 206-1/DIN 1045-2 eingesetzt werden, mit denen bisher in Deutschland keine baupraktischen Erfahrungen vorliegen, müssen entsprechende Nachweise ihrer Eignung im Beton erbracht werden. In Zulassungsverfahren wird üblicherweise der Einfluss der Zemente auf dauerhaftigkeitsrelevante Parameter (z.B. Chlorideindringen, Frostwiderstand) unter definierten Randbedingungen (Grenzrezepturen der Betonzusammensetzung, Vorlagerung der Probekörper, Prüfverfahren, Bewertungskriterien) überprüft.

Feine rezyklierte Gesteinskörnungen, sogenannte Brechsande, sind nicht als Hauptbestandteil gemäß EN 197-1 (Abschnitt 5.2) definiert und dürfen somit nicht im Zement verwendet werden. Zemente unter Verwendung von Brechsand als Hauptbestandteil bedürfen einer Zulassung. Mit den Untersuchungen, die im Rahmen des R-Beton-Teilvorhabens Nr. 5 am Forschungsinstitut der Zementindustrie in Düsseldorf durchgeführt werden, sollen Nachweise erbracht werden, unter welchen produktions- und zementtechnischen Rahmenparametern feine RC-Gesteinskörnungen (Brechsande) als Hauptbestandteil im Zementherstellungsprozess eingesetzt werden könnten. Ziel des Vorhabens ist es unter anderem, einen „Leitfaden zur Verwendung von Brechsanden bei der Herstellung von Zement“ – dem sogenannten R-Zement – zu erstellen. Darüber hinaus sollen anhand dauerhaftigkeitsrelevanter Parameter, die in Laborprüfungen ermittelt werden, Nachweise der Eignung von R-Zementen im Beton erbracht werden.

2 Zusammensetzung und Eigenschaften der R-Zemente

Zemente mit mehreren Hauptbestandteilen werden i.d.R. durch gemeinsames Mahlen bzw. durch getrenntes Mahlen und anschließendes Mischen der Haupt- und Nebenbestandteile sowie des Erstarrungsreglers hergestellt. Die wesentliche Grundlage der in diesem Projekt hergestellten R-Zemente (Laborzemente) bilden die Portlandzemente CEM I der Spenner Zement GmbH & Co. KG, die als Klinkerkomponente eingesetzt wurden und in den Festigkeitsklassen 42,5 R und 52,5 R zur Anwendung kamen. Die im R-Zement verwendeten Brechsande unterscheiden sich in ihrer Zusammensetzung (Herkunft), der Körnung und dem Aufbereitungsverfahren. Zur Anwendung kamen Brechsande aus der Aufbereitung von

- Bahnschwellen (RC 04 T/CTG),
- Gleisschotter (RU 04 T/UTG),
- Betonbruch (B 04 T/BTG) und
- Mauerwerksbruch (M 04 T/MTG)

1 Aim of the project

Through the efficient use of Portland cement clinker, cements with several main constituents provide a means of reducing CO₂ emissions in the production of cement. If cements with several main constituents, for which no practical building experience as yet exists in Germany, are to be used in concrete in accordance with DIN EN 206-1/DIN 1045-2, verification of the suitability of these for use in concrete must be furnished. The approval process usually involves checking the influence of the cements on durability-related parameters (e.g. chloride penetration, freeze-thaw resistance) under defined conditions (border mix formulations of concrete composition, preliminary storage of the test specimens, test method, evaluation criteria).

Fine recycled aggregates, so-called crushed sands, are not defined as main constituent in accordance with EN 197-1 (Section 5.2) and are therefore not allowed to be used in cement. Cements employing crushed sand as main constituent are subject to approval. The objective of the studies performed within the framework of the R-Beton sub-project no. 5 at the Research Institute of the Cement Industry in Düsseldorf is to provide verification of the production and cement-related parameters under which fine RC aggregates (crushed sands) could be used as main constituent in the cement production process. One of the aims of the project is to compile “Guidelines for the use of crushed sands in the production of cement” – known as R cement. In addition, verification of the suitability of R cements in concrete is to be furnished on the basis of durability-related parameters determined in laboratory experiments.

2 Composition and properties of R cements

Cements with several main constituents are generally produced by way of joint or separate grinding and subsequent mixing of the main constituents and supplementary cementitious materials, as well as the setting regulator. The R cements (laboratory cements) produced in this project were essentially based on Portland cements CEM I from Spenner Zement GmbH & Co. KG, which were employed as clinker component and used in strength classes 42,5 R and 52,5 R. The crushed sands used in the R cement differed in terms of their composition (origin), particle size and treatment method. Use was made of crushed sands obtained from the treatment of

- Sleepers (RC 04 T/CTG),
- Track ballast (RU 04 T/UTG),
- Crushed concrete (B 04 T/BTG) and
- Masonry rubble (M 04 T/MTG)

at Scherer & Kohl GmbH & Co. KG. After delivery, the crushed sands were dried and ground to a fineness of approximately 4000 cm²/g according to Blaine in an intermittently operating laboratory ball mill. Finally, the Portland cements were mixed with

^{*)} Das Verbundforschungsprojekt „R-Beton – Ressourcenschonender Beton – Werkstoff der nächsten Generation“ wird mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung gefördert.

^{*)} “R-Beton – Resource-saving concrete – The next-generation material” is a collaborative research project funded by the German Federal Ministry of Education and Research.

der Scherer & Kohl GmbH & Co. KG. Die Brechsande wurden nach Anlieferung getrocknet und in einer diskontinuierlich arbeitenden Laborkugelmühle auf eine Feinheit von ca. 4000 cm²/g nach Blaine gemahlen. Schließlich wurden die Portlandzemente im Labor mit mehlfinem Brechsand zu R-Zement gemischt. Es wurden Anteile von 10 M.-% bzw. 30 M.-% Brechsand im Zement eingestellt.

An allen R-Zementen wurden die Normdruckfestigkeiten im Alter von 2 und 28 Tagen (DIN EN 196) geprüft. Bild 1 zeigt beispielsweise die Druckfestigkeit der R-Zemente mit 30 M.-% Brechsand aus trockener Aufbereitung im Prüfalalter 28 Tagen unter Verwendung der CEM I-Zemente 42,5 R und 52,5 R als Klinkerkomponenten. Aus dem Bild geht hervor, dass die Art des Brechsands keine signifikanten Auswirkungen auf die Druckfestigkeit der R-Zemente hatte, wenn CEM I 52,5 R als Klinkerkomponente verwendet wurde. Die Zemente erfüllten die Anforderungen an einen Zement der Festigkeitsklasse 42,5 R gemäß DIN EN 197-1 Tabelle 2. Wurden die R-Zemente in Kombination mit CEM I 42,5 R hergestellt, zeigten sich in Abhängigkeit von der Art des Brechsands Festigkeitsunterschiede von bis zu 10 N/mm². Gemäß DIN EN 197-1 Tabelle 2 erfüllten diese R-Zemente die Anforderungen der Festigkeitsklasse 32,5 R. Vergleichsweise hohe Normfestigkeiten wurden an den R-Zementen unter Verwendung des Brechsands aus Mauerwerksbruch (M 04 T/MTG) ermittelt.

3 Dauerhaftigkeit der Betone mit R-Zementen

Auf Basis ausgewählter R-Zemente mit 10 M.-% bzw. 30 M.-% Brechsand wurden Betone hergestellt und geprüft. Die Betone hatten folgende Zusammensetzungen:

- B1: z = 300 kg/m³, w/z = 0,60,
- B2: z = 320 kg/m², w/z = 0,50.

Der Widerstand der Betone B2 gegenüber eindringenden Chloriden wurde mithilfe des Migrationstests nach BAW-Merkblatt bzw. EAD 15001-00-0301 untersucht. Die Prüfkörper wurden bis zum Prüfalalter von 35 d bzw. 98 d wassergelagert. Der Chloridmigrationskoeffizient der Betone wurde beispielsweise unter Verwendung der R-Zemente mit 30 M.-% bzw. mit 10 M.-% Brechsand in Kombination mit CEM I 42,5 R ermittelt. Die Ergebnisse der Untersuchungen sind in den Bildern 2 und 3 dargestellt.

Die Verwendung von 30 M.-% Brechsand als Zementbestandteil führte im Prüfalalter von 35 Tagen zu Chloridmigrationskoeffizienten von rd. 24 · 10⁻¹² m²/s bis 30 · 10⁻¹² m²/s. Nach 98 Tagen wurden bei diesen Betonen Migrationskoeffizienten von rd. 26 · 10⁻¹² m²/s bzw. 13 · 10⁻¹² m²/s ermittelt. Die niedrigsten Migrationskoeffizienten erreichte der Beton unter Verwendung des R-Zements mit Brechsand MTG (Mauerwerksbruch). Das in den Zulassungsverfahren des Deutschen Instituts für Bautechnik (DIBt) herangezogene Beurteilungskriterium für den Chloridmigrationskoeffizienten von 25 · 10⁻¹² m²/s im Prüfalalter von 35 Tagen wurde in dieser Versuchsserie nur von diesem Beton eingehalten.

Wurde der Brechsandanteil der im Beton B2 verwendeten R-Zemente von 30 M.-% auf 10 M.-% verringert, erreichten die Migrationskoeffizienten im Prüfalalter von 35 d Werte deutlich unterhalb der vom DIBt geforderten 25 · 10⁻¹² m²/s. Die Anforderungen an den Chlorideindringwiderstand für Anwendungen im Wasserbau (≤ 10 · 10⁻¹² m²/s für XS1-2, XD1-2 bzw. ≤ 5 · 10⁻¹² m²/s für XS3, XD3) wurden nicht erreicht.

Unter Verwendung der R-Zemente mit 30 M.-% Brechsand in Kombination mit CEM I 52,5 R bzw. der R-Zemente mit 10 M.-% Brechsand in Kombination mit CEM I 42,5 R wurden Betone B2 zur Untersuchung der inneren Gefügeschädigung (relativer dynamischer E-Modul) im CIF-Test hergestellt. Die Herstellung der Probekörper und der Ablauf der Prüfung erfolgten gemäß CEN/TR 15177. Die Prüfungen wurden über 56 Frost-Tau-Wechsel durchgeführt. In Deutschland wurden Kriterien für Abwitterungen (CF-Test) und Kriterien für die innere Gefügeschädigung (CIF-Test) von der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) im Merkblatt „Frostprüfung von Beton“ festgelegt.

Bild 4 zeigt den Verlauf des relativen dynamischen E-Moduls der Betone B2 in Abhängigkeit von der Anzahl der Frost-Tau-

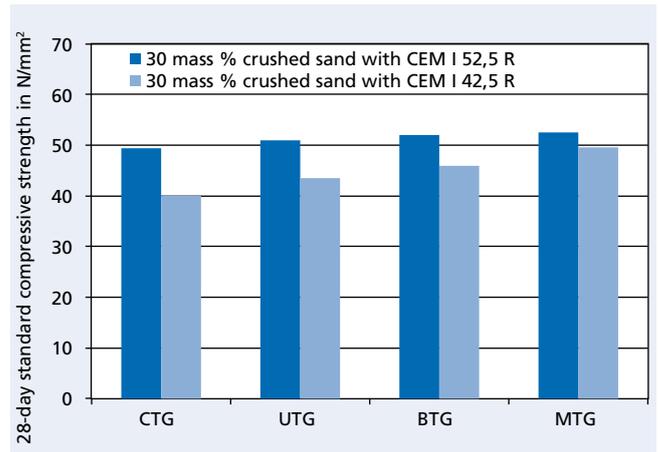


Bild 1: 28-d-Druckfestigkeit der R-Zemente mit 30 M.-% gemahltem Brechsand aus trockener Aufbereitung in Kombination mit CEM I 42,5 R bzw. CEM I 52,5 R

Figure 1: 28-day compressive strength of R cements with 30 mass % ground dry process crushed sand in combination with CEM I 42,5 R and CEM I 52,5 R

finely ground crushed sand in the laboratory to obtain R cement. Proportions of 10 mass % and 30 mass % crushed sand were set in the cement. The 2 and 28-day standard compressive strengths were tested on all R cements (DIN EN 196). By way of example, Fig. 1 shows the compressive strength of the R cements with 30 mass % dry process crushed sand at a test age of 28 days with use of the CEM I cements 42,5 R and 52,5 R as clinker components. As can be seen from the illustration, the type of crushed sand had no significant influence on the compressive strength of the R cements when CEM I 52,5 R was used as clinker component. The cements met the requirements for a cement of strength class 42,5 R in accordance with DIN EN 197-1 Table 2. If the R cements were produced in combination with CEM I 42,5 R, up to 10 N/mm² differences in strength were obtained depending on the type of crushed sand. According to DIN EN 197-1, Table 2, these R cements met the requirements of strength class 32,5 R. Comparatively high standard strengths were found for the R cements using crushed sand from masonry rubble (M 04 T/MTG).

3 Durability of concretes using R cements

Concretes were produced and tested on the basis of selected R cements with 10 mass % and 30 mass % crushed sand. The compositions of the concretes were as follows:

- B1: c = 300 kg/m³, w/c = 0.60,
- B2: c = 320 kg/m², w/c = 0.50.

Resistance of the concretes B2 to chloride penetration was investigated by means of the migration test specified by the Federal Waterways Engineering and Research Institute Code of Practice and EAD 15001-00-0301. The test specimens were stored in water up to a test age of 35 d and 98 d. The chloride migration coefficient of the concretes was determined using the R cements with 30 mass % and 10 mass % crushed sand in combination with CEM I 42,5 R for example. The results of the investigations are shown in Figs. 2 and 3.

The use of 30 mass % crushed sand as main cement constituent resulted in chloride migration coefficients of approx. 24 · 10⁻¹² m²/s to 30 · 10⁻¹² m²/s at a test age of 35 days. After 98 days, migration coefficients of around 26 · 10⁻¹² m²/s and 13 · 10⁻¹² m²/s were determined for these concretes. The lowest migration coefficients were obtained for the concrete using R cement with crushed sand MTG (masonry rubble). This concrete was the only one in this test series to comply with the chloride migration coefficient of 25 · 10⁻¹² m²/s at a test age of 35 days used as assessment criterion in the approval processes of the German Institute for Building Technology.

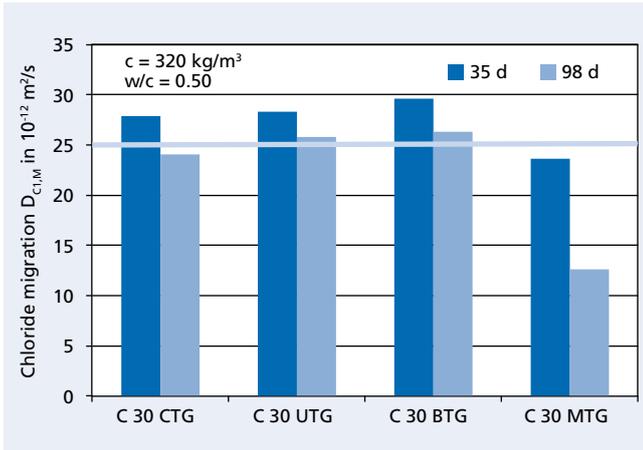


Bild 2: Chloridmigrationskoeffizienten der Betone B2 unter Verwendung der R-Zemente mit 30 M.-% trocken aufbereitetem Brechsand in Kombination mit CEM I 42,5 R im Prüfalalter von 35 d und 98 d, Betone mit $c = 320 \text{ kg/m}^3$, $w/z = 0,50$

Figure 2: Chloride migration coefficients of concretes B2 using R cements with 30 mass % dry process crushed sand in combination with CEM I 42,5 R at a test age of 35 d and 98 d, concretes with $c = 320 \text{ kg/m}^3$, $w/c = 0.50$

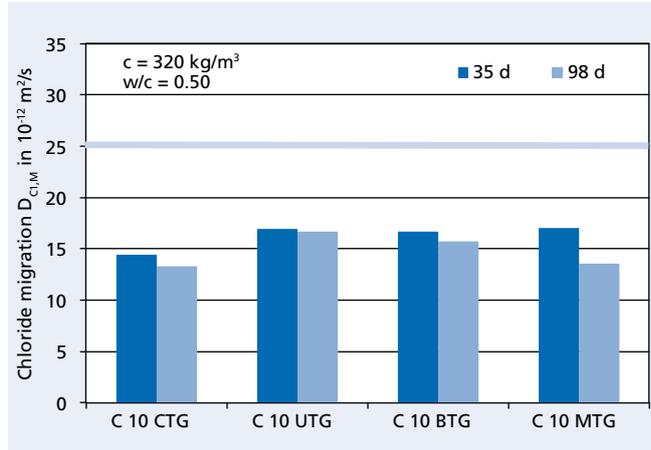


Bild 3: Chloridmigrationskoeffizienten der Betone B2 unter Verwendung der R-Zemente mit 10 M.-% trocken aufbereitetem Brechsand in Kombination mit CEM I 42,5 R im Prüfalalter von 35 d und 98 d, Betone mit $c = 320 \text{ kg/m}^3$, $w/z = 0,50$

Figure 3: Chloride migration coefficients of concretes B2 using R cements with 10 mass % dry process crushed sand in combination with CEM I 42,5 R at a test age of 35 d and 98 d, concretes with $c = 320 \text{ kg/m}^3$, $w/c = 0.50$

Wechsel. Wie daraus hervorgeht, hat nur der Beton, der mit dem R-Zement C 10 MTG aus 10 M.-% Mauerwerksbrechsand und CEM I 42,5 R hergestellt wurde, das maßgebliche Beurteilungskriterium für den CIF-Test eingehalten. Es wurde nach 28 Frost-Tau-Wechseln ein relativer dynamischer E-Modul von > 75 % erzielt. Die Betone, die auf Basis der anderen R-Zemente hergestellt wurden, haben das Beurteilungskriterium für die innere Gefügeschädigung nicht eingehalten.

Aus Bild 5 geht hervor, dass drei von vier Betonen (R-Zemente mit 30 M.-% Brechsand und CEM I 52,5 R) das Beurteilungskriterium für den CIF-Test nach Merkblatt „Frostprüfung von Beton“ eingehalten haben. Der Beton, der mit dem R-Zement Z 30

On reducing the proportion of crushed sand in the R cements used in the concrete B2 from 30 mass % to 10 mass %, the migration coefficients attained values well below the level of $25 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ required by the German Institute for Building Technology at a test age of 35 days. The requirements for resistance to chloride penetration for waterways engineering applications ($\leq 10 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ for XS1-2, XD1-2 and $\leq 5 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ for XS3, XD3) were not attained. R cements with 30 mass % crushed sand in combination with CEM I 52,5 R and R cements with 10 mass % crushed sand in combination with CEM I 42,5 R were used to produce B2 concretes for examination of the internal microstructural damage (relative dynamic modulus of elasticity)

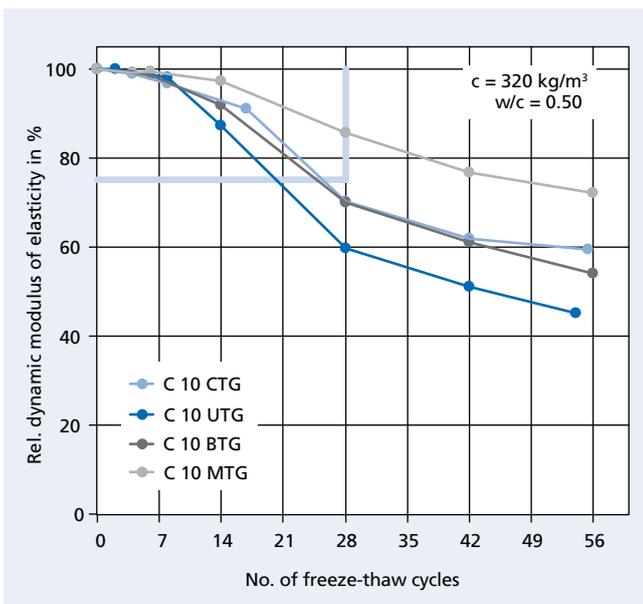


Bild 4: Relativer dynamischer E-Modul der Betone B2 im CIF-Test in Abhängigkeit von der Anzahl der Frost-Tau-Wechsel, R-Zemente mit 10 M.-% trocken aufbereitetem Brechsand in Kombination mit CEM I 42,5 R, Betone mit $c = 320 \text{ kg/m}^2$ und $w/z = 0,50$

Figure 4: Relative dynamic modulus of elasticity of the concretes B2 in the CIF test as a function of the number of freeze-thaw cycles, R cements with 10 mass % dry process crushed sand in combination with CEM I 42,5 R, concretes with $c = 320 \text{ kg/m}^2$ and $w/c = 0.50$

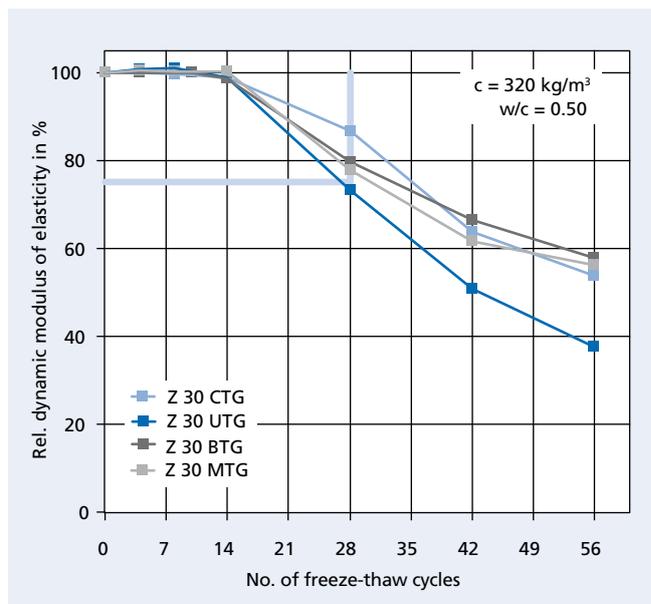


Bild 5: Relativer dynamischer E-Modul der Betone B2 im CIF-Test in Abhängigkeit von der Anzahl der Frost-Tau-Wechsel, R-Zemente mit 30 M.-% trocken aufbereitetem Brechsand in Kombination mit CEM I 52,5 R, Betone mit $c = 320 \text{ kg/m}^2$ und $w/z = 0,50$

Figure 5: Relative dynamic modulus of elasticity of the concretes B2 in the CIF test as a function of the number of freeze-thaw cycles, R cements with 30 mass % dry process crushed sand in combination with CEM I 52,5 R, concretes with $c = 320 \text{ kg/m}^2$ and $w/c = 0.50$

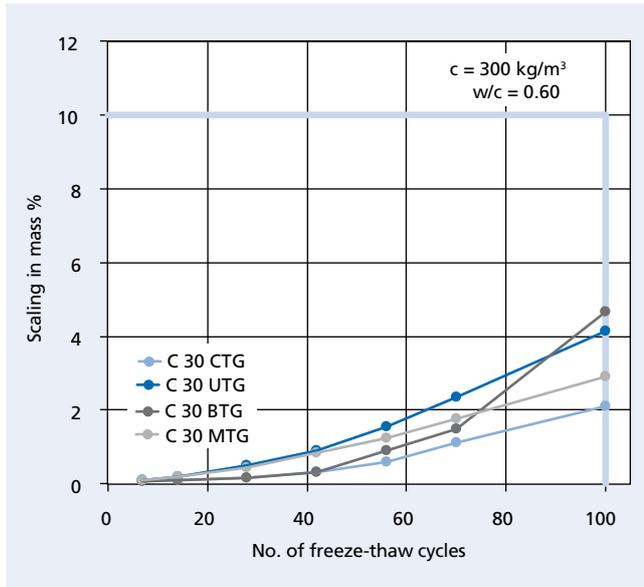


Bild 6: Abwitterungen der Betone B1 im Würfelverfahren in Abhängigkeit von der Anzahl der Frost-Tau-Wechsel, R-Zemente mit 30 M.-% trocken aufbereitetem Brechsand in Kombination mit CEM I 42,5 R, Betone mit $z = 300 \text{ kg/m}^2$ und $w/z = 0,60$
Figure 6: Scaling of the concretes B1 employing the cube method as a function of the number of freeze-thaw cycles, R cements with 30 mass % dry process crushed sand in combination with CEM I 42,5 R, concretes with $c = 300 \text{ kg/m}^2$ and $w/c = 0.60$

UTG (Gleisschotter) hergestellt wurde, hat das maßgebliche Beurteilungskriterium nicht eingehalten. An den anderen Betonen wurde im CIF-Test ein relativer dynamischer E-Modul von > 75 % nach 28 Frost-Tau-Wechseln erzielt.

Die Abwitterungen der Betone zeigen nur geringe Unterschiede in Abhängigkeit von der Art der Brechsande. Bild 6 ist zu entnehmen, dass bei Anwendung von R-Zement mit 30 M.-% Brechsand in Kombination mit CEM I 42,5 R die Abwitterungen mit maximal 4,7 M.-% auf niedrigem Niveau lagen. Bei der Anwendung von R-Zementen im Beton wurde der in den Zulassungsprüfungen des DIBt verwendete Grenzwert für Abwitterungen von 10 M.-% nach 100 Frost-Tau-Wechseln mit Abstand eingehalten.

4 Ausblick

Zur Überprüfung der Übertragbarkeit der Ergebnisse an Laborzementen wurden R-Zemente großtechnisch hergestellt. Portlandzementklinker, Sulfatträger und Brechsand (Mauerwerksbruch) wurden im Rahmen eines Betriebsversuchs im Zementwerk gemeinsam gemahlen. Zur Mahlung wurde eine im Kreislauf mit Sichter betriebene Kugelmühle verwendet. Im R-Zement wurden Brechsandgehalte von 8 M.-% bis 15 M.-% eingestellt. Die Untersuchungen an den großtechnisch hergestellten R-Zementen werden zeigen, welchen Einfluss ein gemeinsames Mahlverfahren bzw. die Zusammensetzung eines Brechsands aus selektivem Rückbau auf die Eigenschaften der R-Zemente sowie auf die Dauerhaftigkeit der mit ihnen hergestellten Betone haben können.

in the CIF test. The test specimens were produced and testing was performed in accordance with CEN/TR 15177. Testing was conducted over the course of 56 freeze-thaw cycles. In Germany, criteria for scaling (CF test) and criteria for internal microstructural damage (CIF test) are stipulated in the Federal Waterways Engineering and Research Institute (BAW) “Freeze-thaw testing of concrete” Code of Practice.

Fig. 4 shows the profile of the relative dynamic modulus of elasticity for the concretes B2 as a function of the number of freeze-thaw cycles. As can be seen, the only concrete to comply with the definitive assessment criterion for the CIF test was the R cement C 10 MTG made from 10 mass % masonry crushed sand and CEM I 42,5 R. A relative dynamic modulus of elasticity of > 75 % was attained after 28 freeze-thaw cycles. The concretes produced on the basis of the other R cements failed to comply with the assessment criterion for internal microstructural damage.

Fig. 5 shows that three of the four concretes (R cements with 30 mass % crushed sand and CEM I 52,5 R) complied with the assessment criterion for the CIF test in accordance with the “Freeze-thaw testing of concrete” code of practice. The concrete produced with the R cement Z 30 UTG (track ballast) did not conform to the definitive assessment criterion. A relative dynamic modulus of elasticity of > 75 % after 28 freeze-thaw cycles was obtained for the other concretes in the CIF test. The scaling of the concretes differs only slightly depending on the type of crushed sands. Fig. 6 shows that there was only a low level of scaling (max. 4.7 mass %) when using R cement with 30 mass % crushed sand in combination with CEM I 42,5 R. When R cements were used in the concrete, the 10 mass % limit value for scaling after 100 freeze-thaw cycles employed in the German Institute for Building Technology approval tests was met.

4 Outlook

R cements were produced on an industrial scale to check the transferability of the results obtained with laboratory cements. Portland cement clinker, sulphate agent and crushed sand (masonry rubble) were jointly ground in the course of a full-scale operational trial at the cement plant. For grinding, use was made of a ball mill operated in a closed circuit with a separator. Crushed sand contents of 8 mass % to 15 mass % were set in the R cement. The studies conducted on the industrially produced R cements will show the possible influence of a joint grinding process and of the composition of crushed sand from selective demolition on the properties of the R cements and on the durability of the concretes made with these.