

Beton als kreislaufgerechter Baustoff

Concrete as a recycable building material

Übersicht

Die Wiederverwendbarkeit der Baustoffe ist ein Beitrag auf dem Weg zu einer nachhaltigen Entwicklung im Bauwesen. Daher wurden die Möglichkeiten der Verwendung aufbereiteter mineralischer Baustoffe als Gesteinskörnung zur Herstellung von Beton und Mauermörtel im Bereich des Hochbaus untersucht. Im Mittelpunkt der Untersuchungen zum Baustoffrecycling stand der Beton als bedeutender und weit verbreiteter Konstruktionswerkstoff. Die Recyclingfähigkeit von Altbeton zur Herstellung von neuem Beton ist schon häufiger behandelt worden. Für die Praxis von Interesse ist jedoch auch, den Beton nicht isoliert, sondern im Verbund mit einigen heute üblicherweise eingesetzten tragenden Mauerwerkbaustoffen zu betrachten. Zur Ableitung maximal möglicher Einsatzmengen der unterschiedlich zusammengesetzten, sog. rezyklierten Gesteinskörnungen wurden Betone und Mörtel untersucht. Dabei wurde diejenige Eigenschaft ermittelt, die eine Wiederverwendung jeweils am stärksten einschränkt. Sie wurde als „Leitgröße“ definiert. Bei der Verwendung mineralischer Baustoffgemische als Gesteinskörnung für Beton erwies sich der statische E-Modul des Betons als „Leitgröße“. Im Hinblick auf die Verwendung von Brechsanden zur Herstellung von Mauermörteln stellte sich die Feuchtedehnung (Schwinden) als sog. Leitgröße heraus. Die gewonnenen Erkenntnisse wurden dazu genutzt, Bauweisen mit Beton in Kombination mit anderen mineralischen Baustoffen im Hinblick auf ihre Kreislauffähigkeit zu untersuchen und zu beurteilen. Dabei konnte u.a. auch festgestellt werden, dass Beton grundsätzlich auch mehrfach ohne wesentliche Qualitätsverluste wiederverwendet werden kann.

Abstract

The re-usability of building materials is one step along the path to sustainable development in building. The options for using processed mineral building materials as aggregate for producing concrete and masonry mortar in building construction were therefore examined. The investigations into the recycling of building materials focused on concrete as being an important and widely used construction material. The recyclability of old concrete for producing new concrete has already been discussed a number of times. For practical purposes, however, it is also of interest to consider concrete, not in isolation, but in conjunction with some of the load-bearing masonry building materials normally used nowadays. Concretes and mortars were investigated in order to derive the maximum possible usable quantities of the recycled aggregates of differing compositions. The property was established which represents the greatest restriction to re-use. It was defined as the “command variable”. The static modulus of elasticity of the concrete proved to be the “command variable” when using mineral building material mixtures as concrete aggregate. When crusher sand is used for producing masonry mortar the command variable turned out to be the shrinkage. The results obtained were used to investigate and assess methods of construction with concrete in combination with other mineral building materials with regard to recyclability. Among other things, it was also established that concrete can be re-used several times without essential loss of quality.

1 Einleitung

Der Begriff „Nachhaltigkeit“ prägt die wissenschaftliche und politische Diskussion seit einigen Jahren wie kaum ein anderer. In einer Vielzahl von Veröffentlichungen, die sich mit dem Leitbild einer „nachhaltig zukunftsverträglichen Entwicklung (= sustainable development)“ beschäftigen, werden als Ausgangspunkt für diese Diskussion stets der Bericht „Our Common Future“ der Brundtland-Kommission der Vereinten Nationen aus dem Jahr 1987 [1] sowie die Konferenz der Vereinten Nationen für Umwelt und Entwicklung (UNCED) in Rio de Janeiro im Jahre 1992 und die dort verabschiedete „Agenda 21“ herangezogen.

Nach der Definition des Berichtes der Brundtland-Kommission ist eine Entwicklung nachhaltig, wenn sie „die Bedürfnisse der Gegenwart befriedigt, ohne zu riskieren, dass künftige Generationen ihre eigenen Bedürfnisse nicht mehr befriedigen können“. Auf der Konferenz in Rio haben sich 178 Staaten zu diesem Leitbild bekannt. Verfolgt man die Auseinandersetzung mit dem Konzept der nachhaltigen Entwicklung, so ist festzustellen, dass zwar einerseits ein breiter gesellschaftlicher Konsens im Hinblick auf das genannte Leitbild zu bestehen scheint, andererseits aber eine, je nach Sichtweise, z.T. sehr unterschiedliche Gewichtung der drei „Grundpfeiler“ Ökonomie, Ökologie und Soziales vorgenommen wird. Auch die Fragen, ob es sich bei diesem Konzept um eine moralische Orientierung oder ein strategisches Prinzip handelt und

1 Introduction

For some years the term “sustainability” has had a greater influence on scientific and political discussions than almost any other. In the numerous publications which deal with the vision for “sustainable development” these discussions always start from the report “Our Common Future” from the United Nations Brundtland Commission of 1987 [1] and from the United Nations Conference on Environment and Development (UNCED) in Rio de Janeiro in 1992 and the “Agenda 21” adopted there.

According to the definition in the Brundtland Commission report a development is sustainable if it “satisfies present needs without entailing the risk that future generations will no longer be able to satisfy their own needs”. 178 countries declared their faith in this vision at the conference in Rio. If the debate over the concept of sustainable development is followed it will be found that there appears to be a wide social consensus with respect to the vision mentioned, but that very different weightings are given to the three “cornerstones”, namely economy, ecology and social needs, depending on the point of view. The questions as to whether this concept deals with a moralistic orientation or a strategic principle and the extent to which the concept can be implemented are also largely still unanswered [2, 3].

The Commission of Enquiry by the German government entitled “Protection of mankind and the environment – aims and

inwieweit sich das Konzept operationalisieren lässt, sind weitgehend offen [2, 3].

Die Enquete-Kommission des Deutschen Bundestages „Schutz des Menschen und der Umwelt – Ziele und Rahmenbedingungen einer nachhaltig zukunftsverträglichen Entwicklung“ hat sich mit diesen Fragen beschäftigt und die Orientierung der Stoffströme an den Zielen der Ressourcenschonung als eine ökologische Zieldimension für den Bereich „Bauen und Wohnen“ formuliert. Die Verwendung sekundärer Rohstoffe zur Herstellung neuer Baustoffe, sei es in Form mineralischer Bauabfälle oder als Abfälle bzw. Nebenprodukte aus anderen Industriebereichen, folgt dieser Zielgröße.

2 Ziel und Umfang der Untersuchungen

Anhand von Literaturdaten und eigenen Versuchen sollten die Möglichkeiten der Verwendung rezyklierter Gesteinskörnungen aus Beton und mineralischen Baustoffgemischen zur Herstellung von neuem Beton aufgezeigt und die Verwendung sekundärer Rohstoffe aus anderen Industriebereichen im Hinblick auf den Erhalt der Kreislauffähigkeit des Baustoffs Beton kritisch hinterfragt werden. Dabei wurde auch der Frage des Mehrfachrecyclings von Beton nachgegangen. Für die bei der Aufbereitung von Beton und Mauerwerkbaustoffen anfallenden Brechsande, die nicht oder nur bedingt im Kreislauf „Beton“ gehalten bzw. verwertet werden können, wurde der Einsatz als Gesteinskörnung zur Herstellung von Mauerwerkbaustoffen als alternative Verwertungsmöglichkeit betrachtet. Hierzu wurden ebenfalls Literaturdaten und eigene Versuche herangezogen. Die gewonnenen Erkenntnisse wurden dazu genutzt, Bauweisen mit Beton in Kombination mit anderen mineralischen Baustoffen im Hinblick auf ihre Kreislauffähigkeit zu untersuchen und zu beurteilen.

Nachfolgend werden einige der erzielten Ergebnisse dargestellt. Die im Institut für Bauforschung der RWTH Aachen durchgeführten Versuche wurden aus Mitteln des Bundesministers für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie (bmb+f) im Rahmen des Forschungsvorhabens „Baustoffkreislauf im Massivbau (BiM)“ finanziert. Eine ausführliche Diskussion aller Untersuchungsergebnisse und der darüber hinaus gehenden gesamtökologischen Betrachtungen erfolgt in der Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton [4].

3 Versuchsdurchführung

3.1 Herstellung und Prüfung der rezyklierten Gesteinskörnungen

Zur gezielten Untersuchung verschiedener Gesteinskörnungseigenschaften, ihrer Zusammenhänge und deren Einfluss auf die Eigenschaften von Beton wurden Gesteinskörnungsgemische definierter Zusammensetzung hergestellt. Als Ausgangsstoffe wurden Betonbruch (BB), zwei Sorten Ziegelbruch mit unterschiedlicher Rohdichte (ZB1, ZB2) sowie Kalksandsteinbruch (KSB) verwendet. Insgesamt lagen die Kornrohdsichten zwischen rd. 1,6 kg/dm³ und rd. 2,4 kg/dm³. Die Herstellung der Ausgangsmaterialien erfolgte durch Zerkleinerung in Backenbrecher und Prallmühle in der in [5] beschriebenen Stoffaufbereitungsanlage. Die Kornrohdsichte und die Wasseraufnahme der rezyklierten Gesteinskörnungen wurde gemäß [6] bestimmt. Danach wird die Kornrohdsichte im Anschluss an die Prüfung der Wasseraufnahme nach 24 h mit dem Pycnometerverfahren am mattfeuchten Material ermittelt. Die Schüttdichte, der Druckwert D und die Kornform wurden nach DIN 4226-3:1983-04 bestimmt. Zur Ermittlung des Zementanteils des aus Laborbetonen bekannter Zusammensetzung hergestellten Betonsplitts in Abschnitt 4.3 wurden die Parameter SiO₂, CaO sowie Salzsäureunlösliches (UR) aus der chemischen Zusammensetzung der rezyklierten Gesteinskörnungen und der verwendeten Ausgangsstoffe Zement und Rheinkiesand herangezogen. Eine ausführliche Beschreibung der Vorgehensweise enthält [4].

3.2 Herstellung und Prüfung von Beton mit rezyklierten Gesteinskörnungen

Die Herstellung aller Betone erfolgte in einem Zwangsmischer mit einem Nenninhalt von 120 l. Zur Herstellung der Betone mit rezyklierten Gesteinskörnungen wurde die zuvor

framework conditions for sustainable development” has dealt with these questions and has taken orientation of the flow of material towards the objectives of conservation of resources as an ecological target for the “Building and Housing” sector. The use of secondary raw materials for producing new building materials, whether in the form of mineral building waste or as wastes or secondary products from other sectors of industry, complies with this objective.

2 The aim and scope of the investigations

The intention was to make use of literature data and in-house investigations to point out possible ways of using recycled aggregates made from concrete and mixtures of mineral building materials for producing new concrete, and to carry out a critical examination of the use of secondary raw materials from other sectors of industry with respect to maintaining the recyclability of concrete as a building material. The question of repeated recycling of concrete was also examined. Little or none of the crusher sand produced during the processing of concrete and masonry building materials can be kept or utilized in the “concrete” cycle. The use of crusher sand as aggregate for producing masonry mortars was therefore examined as a possible alternative method of utilization, again based on literature data and in-house investigations. The findings obtained were used to investigate and assess methods of construction with concrete in combination with other mineral building materials with respect to their recyclability.

Some of the results obtained are described below. The tests carried out in the Institute of Building Materials Research at Aachen University of Technology were financed from funds provided by the Federal Ministry for Education, Science, Research and Technology as part of the research project entitled “Recycling of Mineral Building Materials”. There is a thorough discussion of all the results of the investigation and the overall ecological considerations which go beyond them in the series of papers published by the German Committee for Reinforced Concrete [4].

3 Test procedure

3.1 Production and testing of recycled aggregates

Mixtures of aggregates of defined composition were produced for the carefully controlled investigation of various aggregate properties, their relationships and their influence on the properties of concrete. Crushed concrete (BB), two types of crushed clay brick with different bulk densities (ZB1, ZB2) and crushed sand-lime bricks (KSB) were used as the starting materials. As a whole the apparent densities lay between about 1.6 kg/dm³ and about 2.4 kg/dm³. The starting materials were produced by comminution in jaw crushers and impact mills in the recycling plant described in [5]. The apparent density and the water absorption of the recycled aggregates were determined as described in [6]. The bulk density was determined by the pycnometer method on surface-moist material at the conclusion of the test for water absorption after 24 h. The bulk density, the grains strength D and the particle shape were determined in accordance with DIN 4226-3:1983-04. The parameters SiO₂, CaO and the acid-insolubles of the recycled aggregates and the original cement and the Rhine sand and Rhine gravel were employed for determining the proportion of hardened cement paste in the concrete chippings produced from laboratory concretes of known composition in Section 4.3. A detailed description of the procedure is given in [4].

3.2 Production and testing of concrete made with recycled aggregates

All the concretes were produced in a mechanical mixer with a nominal capacity of 120 l. The previously kiln-dried aggregates (natural sand and recycled aggregate) were first pre-wetted to produce concretes made with recycled aggregates. As a rule the quantity of water used was the quantity absorbed within 10 minutes by the aggregate dried at 105 °C plus 20 % of the mixing water. For the mixes in which the aggregate > 2 mm consisted entirely, or about 50 vol.%, of crushed clay bricks, the quantity of water used was the quantity absorbed by the aggregate within 30 minutes. The aggregates remained in the covered mixer for 10 minutes after which the cement and the rest of the water were added. Where necessary the mixes

ofengetrocknete Gesteinskörnung (Natursand und rezyklierte Gesteinskörnung) zunächst vorgegast. Dazu wurde i.d.R. die Wassermenge, die bei 105 °C getrocknete Gesteinskörnung innerhalb von 10 Minuten aufnahm, sowie 20 % der Zugabewassermenge verwendet. Bei den Mischungen, in denen die Gesteinskörnung > 2 mm ganz oder zu rd. 50 Vol.-% aus Ziegelbruch bestand, wurde die Wassermenge eingesetzt, die die Gesteinskörnung innerhalb von 30 Minuten aufnahm. Danach blieb die Gesteinskörnung 10 Minuten im abgedeckten Mischer. Anschließend wurden Zement und die Restwassermenge zugegeben. Die Mischungen wurden – falls notwendig – mit einem Fließmittel auf die Konsistenz KR (Zielgröße: $a_{10} = 450$ mm bis 490 mm) eingestellt. Gesteinskörnung, Zement und Wasser wurden zunächst 1 Minute gemischt. Nach einer Standzeit von 5 Minuten wurde Fließmittel zudosiert und 1,5 Minuten fertiggemischt. Dabei wurde innerhalb der ersten Minute, wenn notwendig, durch weitere Fließmittelzugabe die Konsistenz korrigiert. Die zusätzlichen „Saugwassermengen“ wurden in der Stoffraumrechnung jeweils gewichtsmäßig, nicht aber volumenmäßig berücksichtigt. Es wurde also davon ausgegangen, dass die Gesteinskörnung diese Wassermenge vollständig aufnimmt.

Die Druck- und die Spaltzugfestigkeit sowie der statische E-Modul des Betons wurden gemäß DIN 1048-5 bestimmt. Das Kriechmaß, das Schwindmaß und die Carbonatisierungstiefe der Betone wurden nach den in [7] beschriebenen Verfahren ermittelt. Rechnerische Endwerte wurden mit dem Hyperbelansatz von Ross abgeleitet. Der Frostwiderstand des Betons wurde nach dem Würfelverfahren [7] sowie mit dem CF- bzw. CIF-Test [8, 9] geprüft. Der Widerstand des Betons gegenüber eindringenden Chloriden wurde mit Hilfe eines Schnellverfahrens (Migrationstest) ermittelt. Das Grundprinzip des Schnellverfahrens [10] basiert auf der Beschleunigung des Ionentransports durch das Anlegen einer elektrischen Spannung. Bei dieser Versuchsanordnung ist der Ionentransport über das elektrische Feld maßgebend und es ergibt sich ein scharfes Chloridprofil, aus dem ein sog. Migrationskoeffizient D_{CLM} abgeleitet wird. Eine genaue Beschreibung der Versuchsdurchführung und -auswertung enthält z.B. [11]. Die Feststellung der Porenradialverteilung erfolgte mit Hilfe der Quecksilberdruckporosimetrie mit dem Hg-Porosimeter Autopore 9220 der Firma Micromeritics. Es wurden Intrusionskurven im Druckbereich von 0,005 MPa bis 400 MPa aufgezeichnet. Dies entspricht einem Radialbereich von 150 µm bis 1,8 nm. Die Wasseraufnahme bei einem Druck von 15 MPa (W_{vD}) wurde gemäß DIN 52 103 bestimmt. Dieser Wert ist ein Maß für die gesamte offene Porosität.

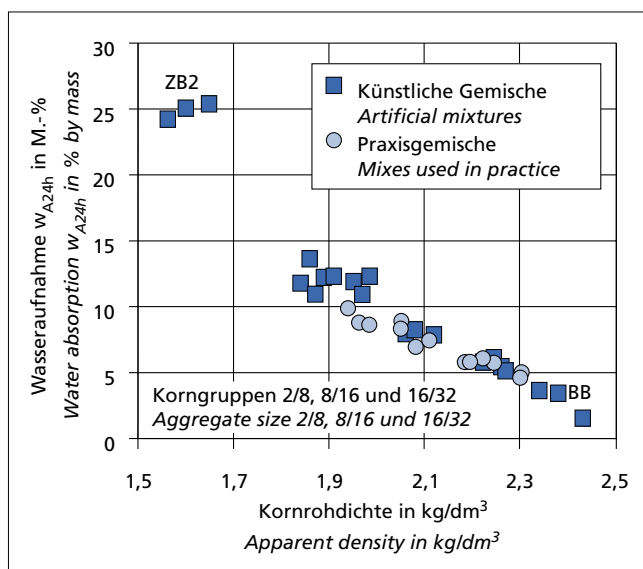


Bild 1: Zusammenhang zwischen der Wasseraufnahme nach 24 h unter Atmosphärendruck und der Kornrohddichte von Praxisgemischen und künstlich hergestellten rezyklierten Gesteinskörnungen
Figure 1: Relationship between water absorption after 24 h under atmospheric pressure and the apparent density of mixes used in practice and of artificially produced recycled aggregates

were adjusted to the KR consistency (target value: $a_{10} = 450$ mm to 490 mm) with a superplasticizer. The aggregates, cement and water were first mixed for 1 minute. After a standing time of 5 minutes the superplasticizer was added and the final mixing was carried out for 1.5 minutes. Where necessary the consistency was corrected within the first minute by further addition of superplasticizer. In each case the weight, but not the volume, of the additional quantity of “absorption water” was taken into account when calculating the material volume. It was therefore assumed that the aggregate fully absorbs this quantity of water.

The compressive strength and the splitting tensile strength tests as well as the static modulus of elasticity of the concrete were determined in accordance with DIN 1048-5. The creep, the shrinkage and the depth of carbonation of the concretes were determined by the methods described in [7]. Theoretical ultimate values were derived using the Ross hyperbolic formula. The freeze-thaw resistance of the concrete was tested by the cube method [7] as well as by the CF or CIF test [8, 9]. The resistance of the concrete to penetrating chlorides was determined with the aid of an accelerated test (migration test). The principle of the accelerated test [10] is based on acceleration of the ion transport by applying an electrical voltage. In this test the ion transport is governed by the electrical field, and a sharp chloride profile is obtained from which a migration coefficient D_{CLM} can be derived. An accurate description of the test procedure and evaluation is given in, for example, [11]. The pore size distribution was determined with the aid of mercury intrusion porosimetry using the Autopore 9220 Hg porosimeter from Micromeritics. Intrusion curves were recorded in the pressure range from 0.005 MPa to 400 MPa. This corresponds to a range of radii from 150 µm to 1.8 nm. The water absorption at a pressure of 15 MPa (W_{vD}) was determined in accordance with DIN 52 103. This value is a measure of the open porosity.

3.3 Production and testing of masonry mortars made with recycled aggregates

A quantity of solids of 1850 g was normally used for producing the masonry mortar in conformity with the standard DIN 18555-1 [12]. When using aggregate mixes with lighter clay brick sands the quantity of solids was modified so that approximately the same volume was obtained. The requisite quantity of water was determined by adjusting the consistency. The quantity of water in the mixes in the preliminary investigations was varied until a flow diameter of between 165 mm and 175 mm was obtained for two mixes.

The compressive strength was determined on 40 x 40 x 160 mm³ mortar prisms. Deviating from DIN 18555-3 the compressive strength was determined at a loading rate of 320 N/s so that the fracture occurred within a period of 30 to 90 s. This corresponds to the test conditions as defined in prEN 1015-11 [13]. The flexural tensile strength was determined before the compressive strength test on the same test pieces in accordance with DIN 18555-3. The change in length of the mortar as a result of moisture changes was determined as defined in DIN 52 450 [14] with a Type B test unit. The first measurement was made after the test piece was removed from the mould. The value measured when the prism was moved to the standard 20/65 climate after 7 days was defined as the reference value (0 measurement). Further measurements were carried out up to about 400 days after the 0 measurement.

4 Representation and discussion of the results

4.1 Properties of recycled aggregates

Five plants for processing used building materials were sampled in order to classify the properties of the selectively produced recycled aggregates. The plants differed in the type of processing (wet and dry processing), the degree of mobility (stationary, semi-mobile), the starting materials (composition, incoming checks, pre-sorting) and the throughputs achieved.

Figure 1 shows clearly that the range of materials examined in the plants being sampled was covered and extended at both ends of the apparent density scale by the synthetic mixes, i.e. the plain concrete chippings and plain ZB2 crushed clay bricks. The plain ZB2 crushed clay bricks introduced a material into the investigations which in fact may only rarely be found in the building rubble ob-

Tafel 1: Eigenschaften der Ausgangsmaterialien zur Herstellung von mineralischen Baustoffgemischen
Table 1: Properties of the starting materials for producing mineral building material mixes

Parameter Parameter		Gesteinskörnung / Aggregate								
		BB		ZB1		ZB2		KSB		
		2/8 mm	8/16 mm	2/8 mm	8/16 mm	2/8 mm	8/16 mm	2/8 mm	8/16 mm	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Dichte ρ Density ρ	kg/dm ³	2,590	2,600	2,660	2,660	2,840	2,860	2,590	2,550	
Rohdichte ρ_{Rg} Apparent density ρ_{Rg}		2,340	2,380	1,910	1,890	1,650	1,600	1,970	1,860	
Schüttdichte ρ_s Bulk density ρ_s		1,230	1,230	0,930	0,920	0,780	0,750	0,970	0,910	
Druckwert D Grain strength D	kN	58 ²⁾	39	30 ²⁾	19	29 ²⁾	18	20 ²⁾	12	
WA ¹⁾	10 min	M.-%	3,2	3,0	9,8	9,3	20,9	22,6	10,0	13,0
	30 min		3,2	3,0	10,0	9,6	21,4	23,0	10,5	13,0
	24 h		3,5	3,3	12,3	12,2	25,3	25,0	10,9	13,6
Kornform (> 3:1) Form index (> 3:1)		5,2 ²⁾	6,2	4,9 ²⁾	9,2	18,2 ²⁾	57,0	2,2 ²⁾	2,5	
Kornporigkeit p_k ³⁾ Grain porosity p_k ³⁾	Vol.-%	9,7	8,5	28,2	28,9	41,9	43,9	23,9	27,1	

¹⁾ W_A: Wasseraufnahme / Water absorption ²⁾ bestimmt an der Korngruppe 4/8 / determined on aggregate fraction 4/8 ³⁾ $p_k = (1 - \rho_{Rg} / \rho) \cdot 100$

3.3 Herstellung und Prüfung von Mauermörteln mit rezyklierten Gesteinskörnungen

Entsprechend den Vorgaben der DIN 18 555-1 [12] wurde zur Herstellung der Mauermörtel i.d.R. eine Feststoffmenge von 1850 g angesetzt. Bei Verwendung von Gesteinskörnungsgemischen mit leichteren Ziegelsanden wurde die Feststoffmenge so modifiziert, dass sich in etwa ein gleiches Volumen ergab. Die erforderliche Wassermenge wurde über die Einstellung der Konsistenz ermittelt. In den durchgeführten Voruntersuchungen wurde die Wassermenge beim Mischen solange variiert, bis sich für zwei Mischungen ein Ausbreitmaß zwischen 165 mm und 175 mm einstellte.

Die Bestimmung der Druckfestigkeit erfolgte an Mörtelprismen mit den Abmessungen 40 x 40 x 160 mm³. Abweichend von DIN 18 555-3 wurde die Druckfestigkeit mit einer Belastungsgeschwindigkeit von 320 N/s bestimmt, so dass der Bruch innerhalb eines Zeitraumes von 30 bis 90 Sekunden eintrat. Dies entspricht den Prüfbestimmungen nach prEN 1015-11 [13]. Die Bestimmung der Biegezugfestigkeit erfolgte vor der Druckfestigkeitsprüfung an den gleichen Probekörpern gemäß DIN 18 555-3. Die Feuchtedehnung der Mörtel wurde nach DIN 52 450 [14] mit einem Messgerät Typ B bestimmt. Die erste Messung erfolgte nach dem Ausschalen der Prüfkörper. Als Bezugswert (0-Messung) wurde der Messwert bei Umlagerung der Prismen nach 7 Tagen in das Normklima 20/65 festgelegt. Weitere Messungen wurden bis rd. 400 Tage nach der 0-Messung durchgeführt.

4 Darstellung und Diskussion der Ergebnisse

4.1 Eigenschaften rezyklierter Gesteinskörnungen

Zur Einordnung der Eigenschaften der gezielt hergestellten rezyklierten Gesteinskörnungen wurden fünf Baustoffaufbereitungsanlagen beprobt. Die Anlagen unterschieden sich durch die Art der Aufbereitung (Nass- und Trockenaufbereitung), den Mobilitätsgrad (stationär, semimobil), die Ausgangsstoffe (Zusammensetzung, Annahmekontrollen, Vorsortierung) sowie die erreichten Durchsatzmengen.

Bild 1 verdeutlicht, dass mit den künstlichen Gemischen die Bandbreite der in den beprobten Anlagen untersuchten Materialien abgedeckt und an beiden Enden der Rohdichteskala durch die Auswahl von sortenreinem Betonsplitt und sortenreinem Ziegelbruch ZB2 ergänzt wurde. Mit dem reinen Ziegelbruch ZB2 wurde dabei ein Material in die Untersuchungen mit einbezogen, das zwar im heute anfallenden Bauschutt nur selten enthalten sein dürfte, in zukünftig zu behandelnden mineralischen Baustoffgemischen aber

tained nowadays but will play a greater part in the mineral building material mixtures to be handled in the future. The main properties of the plain aggregates are summarized in Table 1. If aerated and lightweight concretes – which as a rule are deliberately removed when the building materials are processed – are disregarded then the investigations with these materials cover the lower boundary region of mineral building material mixes.

4.2 Concrete made with recycled aggregates

4.2.1 Composition of recycled aggregates and of the concretes produced with them

The 2/16 mm recycled aggregates were used in different proportions as shown in Table 2. The aggregate mixes were designated in accordance with their compositions. The first letter gives the main constituent. The other letters follow in the sequence of the volumetric proportions of the constituents. Only Rhine sand (RS) was used in the 0/2 mm particle size group.

Mix formulations with a CEM I 32,5 R Portland cement and scheduled water/cement ratios (w/c)¹⁾ of 0.55 to 0.75 and another concrete mix formulation with CEM I 42,5 Portland cement and a scheduled w/c of 0.33 were used for the concrete trials. A CEM III/B 42,5 cement with a scheduled w/c of 0.45 was used in a few tests. Cement contents between 240 kg/m³ and 485 kg/m³ were obtained by setting a constant aggregate volume in the concretes of 0.7 m³/m³.

4.2.2 Fresh concrete properties

The data on which the following comments are based are documented in [4]. All the concretes exhibited good cohesion without any segregation or bleeding. They could be placed without any problem. As a whole, no significant influence of the type of recycled aggregate – caused possibly by the porosity or the apparent density – could be detected during the placement. The water content in the concrete played a part. Fairly severe stiffening was detected at (w/c)^{scheduled} = 0.33 and w = 160 l/m³, in some cases with a drop in apparent density. This effect occurred to a significantly lesser extent with (w/c)^{scheduled} = 0.55 and w = 176 l/m³. To summarize, it was established that as a rule increased stiffening of the concrete has to be expected when using recycled aggregates – including pre-

¹⁾ In all cases the value of w/c given in the figures and tables means the scheduled water/cement ratio. The effective water/cement ratio cannot be stated accurately except for the concretes made entirely with Rhine sand and Rhine gravel.

eine größere Rolle spielen wird. Die wesentlichen Eigenschaften der sortenreinen Gesteinskörnungen sind in Tafel 1 zusammengestellt. Lässt man Poren- und Leichtbeton – die bei der Baustoffaufbereitung i.d.R. gezielt aussortiert werden – außer Acht, so wurde mit diesem Material der untere Randbereich mineralischer Baustoffgemische untersucht.

4.2 Beton mit rezyklierten Gesteinskörnungen

4.2.1 Zusammensetzung rezyklierter Gesteinskörnungen und damit hergestellter Betone

Die rezyklierten Gesteinskörnungen 2/16 mm wurden in unterschiedlichen Anteilen gemäß Tafel 2 eingesetzt. Die Gesteinskörnungsgemische wurden entsprechend ihrer Zusammensetzung bezeichnet. Dabei gibt der erste Buchstabe den Hauptbestandteil an. Die weiteren Buchstaben folgen in der Reihenfolge der Volumenanteile der Bestandteile. In der Korngruppe 0/2 mm wurde ausschließlich Rheinsand (RS) verwendet.

Für die Betonversuche wurden Rezepturen mit einem Portlandzement CEM I 32,5 R und planmäßigen w/z-Werten (w/z_{plan})¹⁾ von 0,55 bis 0,75 sowie eine weitere Betonrezeptur mit CEM I 42,5 und einem planmäßigen Wasserzementwert (w/z_{plan}) = 0,33 verwendet. Bei einigen wenigen Versuchen wurde ein Zement CEM III/B 42,5 bei einem planmäßigen Wasserzementwert (w/z_{plan}) = 0,45 verwendet. Durch die Einstellung eines konstanten Gesteinskörnungsvolumens des Betone von $0,7 \text{ m}^3/\text{m}^3$ ergaben sich Zementgehalte zwischen $240 \text{ kg}/\text{m}^3$ und $485 \text{ kg}/\text{m}^3$.

4.2.2 Frischbetoneigenschaften

Die den nachfolgenden Ausführungen zugrunde liegenden Daten sind in [4] dokumentiert. Alle Betone wiesen einen guten Zusammenhalt auf und zeigten weder ein Entmischen noch ein Bluten. Sie ließen sich problemlos verarbeiten. Insgesamt konnte beim Verarbeiten kein eindeutiger Einfluss der Art der rezyklierten Gesteinskörnung – etwa anhand der Porosität bzw. der Kornroh-dichte – festgestellt werden. Das Wasserangebot im Beton spielte eine Rolle. Bei (w/z_{plan}) = 0,33 und $w = 160 \text{ l}/\text{m}^3$ war mit sinkender Kornroh-dichte teilweise ein stärkeres Ansteifen festzustellen. Dieser Effekt trat bei (w/z_{plan}) = 0,55 und $w = 176 \text{ l}/\text{m}^3$ in deutlich geringerem Umfang auf. Zusammenfassend war festzustellen, dass bei der Verwendung rezyklierter Gesteinskörnung – auch bei vorgemasteten Gesteinskörnungen – i.d.R. mit einem verstärkten Ansteifen des Betons gerechnet werden muss. Diese Tatsache stellt keine grundsätzliche Einschränkung der Verwertbarkeit dar, da die angestrebte Konsistenz auf der Baustelle durch eine zusätzliche Zugabe verflüssigender Betonzusatzmittel eingestellt werden kann. Die letztlich notwendige Zusatzmittelmenge sollte vorab im Rahmen einer erweiterten Eignungsprüfung ermittelt werden. Der erhöhte Einsatz von Betonzusatzmitteln könnte jedoch aus Kostengründen ein Hemmnis für den Einsatz rezyklierter Gesteinskörnungen darstellen.

4.2.3 Festigkeits- und Verformungsverhalten

Die Tafeln 3 und 4 geben einen Überblick der ermittelten Kennwerte. Tafel 3 enthält die Druckfestigkeit, die Spaltzugfestigkeit, den statischen E-Modul, die Querdehnzahl sowie die Längsdehnung der Betone im Bruchzustand im Alter von 28 Tagen für die Betone mit planmäßigen Wasserzementwerten von 0,33, 0,50 und 0,75 bei Verwendung der Zemente CEM I 32,5 R und CEM I 42,5 R. Die Druckfestigkeiten der Betone mit Zement CEM I 32,5 R und einem planmäßigen Wasserzementwert (w/z_{plan}) = 0,60 sind zusammen mit den Ergebnissen der zugehörigen Kriech- und Schwindversuche in Tafel 4 enthalten. Dort wurden außerdem die gesamte offene Porosität der Betone nach DIN 52 103 und die aus den Kriechversuchen für diese Betone abgeleiteten statischen E-Moduln eingetragen.

¹⁾ In den Bildern und Tafeln sind mit w/z stets die planmäßigen Wasserzementwerte gemeint. Eine exakte Angabe des effektiven (= wirksamen) Wasserzementwerts ist, mit Ausnahme der Betone ausschließlich mit Rheinkiesand, nicht möglich.

Tafel 2: Übersicht der eingesetzten Gesteinskörnungsgemische > 2 mm, Angaben bezogen auf den Gesteinskörnungsanteil > 2 mm
Table 2: Review of the aggregate mix > 2 mm used; values refer to the aggregate fraction > 2 mm

Bezeichnung der Gesteinskörnungsgemische Marking of the aggregate mixtures	Ausgangsgesteinskörnungen / Starting aggregates				
	N	BB	ZB1	ZB2	KSB
	Vol.-%				
1	2	3	4	5	6
N	100	-	-	-	-
BB	-	100	-	-	-
ZB1	-	-	100	-	-
BZK1	-	48	42	-	10
BZK2	-	75	12,5	-	12,5
ZB2	-	-	-	100	-
KN	29	-	-	-	71
NBZK	66	10	-	14	10

- N: Natürliche Gesteinskörnung (Rheinkiesand)
Natural aggregate (Rhine sand and Rhine gravel)
BB: Betonbruch (Betonsplitt und Betonbrechsand)
Crushed concrete (concrete chippings and concrete crusher sand)
ZB: Ziegelbruch (Ziegelsplitt und Ziegelbrechsand)
Crushed clay bricks (brick chippings and brick crusher sand)
KSB: Kalksandsteinbruch (Kalksandsteinsplitt und Kalksandsteinbrechsand)
Crushed sand-lime bricks (sand-lime brick chippings and sand-lime brick crusher sand)

wetted aggregates. This fact does not represent any basic restriction of the usability as the required consistency can be obtained at the building site by adding extra plasticizing concrete admixture. The quantity of admixture ultimately necessary should be determined in advance as part of extended initial testing. The increased use of concrete admixtures may, however, represent an obstacle to the use of recycled aggregates on cost grounds.

4.2.3 Strength and deformation behaviour

Tables 3 and 4 provided a summary of the characteristic values determined. Table 3 gives the compressive strength, the splitting tensile strength, the static modulus of elasticity, Poisson's ratio, and the ultimate longitudinal strain of the concretes at 28 days for the concretes with scheduled water/cement ratios of 0.33, 0.50 and 0.75 when using the CEM I 32,5 R and CEM I 42,5 R cements. The compressive strengths of the concretes made with CEM I 32,5 R and a scheduled water/cement ratio ($w/c_{\text{scheduled}}$) = 0.60 are given in Table 4 together with the results of the associated creep and shrinkage tests. The total open porosity of the concretes as defined in DIN 52103 and the static modulus of elasticity for these concretes derived from the creep tests are also included.

Compressive strength and splitting tensile strength

With appropriate concrete technology measures – i.e. a low water/cement ratio – concrete compressive strengths of up to about $57 \text{ N}/\text{mm}^2$ in cubes with an edge length of 150 mm (compressive strength class C45/55 as specified in DIN EN 206-1) were achieved using recycled aggregates made from 2/16 mm mineral building material mixtures with apparent densities down to about $1.60 \text{ kg}/\text{dm}^3$ (clay brick chippings made from perforated bricks) in combination with Rhine sand with an average apparent density of the 0/16 mm aggregate mix of about $2.0 \text{ kg}/\text{dm}^3$ (Table 3). With an otherwise identical concrete composition the maximum loss in compressive strength compared to a concrete made with Rhine sand and Rhine gravel was about 30 %.

The splitting tensile strengths determined on the concretes examined here made with recycled aggregates were all lower than those of the concretes made with Rhine sand and Rhine gravel but of otherwise identical composition. The results show that a reduction of the splitting tensile strength of up to 20 % can be expect-

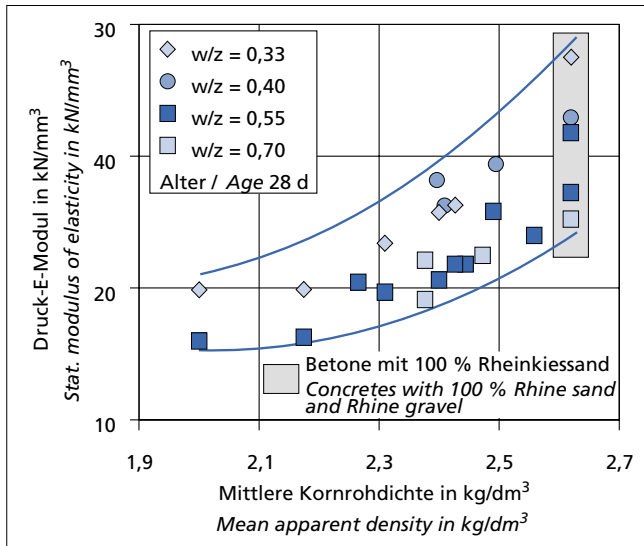


Bild 2: Einfluss rezyklierter Gesteinskörnungen auf den statischen E-Modul von Beton bei unterschiedlicher mittlerer Kornrohddichte der Gesteinskörnungen

Figure 2: Influence of recycled aggregates on the static modulus of elasticity of concrete for different average apparent densities of the aggregate

Druckfestigkeit und Spaltzugfestigkeit

Mit entsprechenden betontechnischen Maßnahmen – d.h. einem niedrigen Wasserzementwert – konnten mit rezyklierten Gesteinskörnungen aus mineralischen Baustoffgemischen 2/16 mm mit einer Kornrohddichte bis zu rd. 1,60 kg/dm³ (Ziegelsplitt aus Hochlochziegeln), in Kombination mit Rheinsand bei ei-

ed when using 100 vol.% recycled aggregates > 2 mm with apparent densities of down to about 1.6 kg/m³ and 0/2 mm Rhine sand (grading curve A/B 16) with otherwise identical concrete composition. For the same compressive strength the splitting tensile strengths of these concretes therefore lay at the lower end of the range usually found with normal concretes.

Static modulus of elasticity

At 28 days the compressive elastic moduli of the recycled aggregates used here were reduced by up to about 50 % when compared with the corresponding concretes made with Rhine gravel and sand – virtually regardless of the water/cement ratio. Figure 2 shows the relationship between the static modulus of elasticity and the apparent density of the aggregate used.

These results show that with aggregate mixes of natural and recycled aggregates > 2 mm with an average apparent density > 2.4 kg/dm³ it is possible to produce concretes with static moduli of elasticity which lie within the range of variation of concretes complying with DIN 1045:1988-07 (without lightweight concrete), bearing in mind that the elastic moduli of normal concrete made with natural aggregates have a range of variation of up to ± 35 % (cf. e.g. [15]). The modulus of elasticity is used for checking the bending under service load when designing reinforced concrete components complying with DIN 1045. The calculated values in Table 11 of DIN 1045 should be used “if more accurate data are not required”. A reduced modulus of elasticity compared with concretes made with Rhine sand and Rhine gravel is to be expected when recycled aggregates are used and – if necessary – should be determined as part of initial testing.

Taking the other concrete properties shown in the following sections into account it was established that the static modulus of elasticity is the characteristic value which substantially determines the upper limit to the use of recycled aggregates made from concrete, masonry bricks and sand-lime bricks if the concrete com-

Tafel 3: Ergebnisse zum Festigkeits- und Verformungsverhalten untersuchter Betone im Alter von 28 d
Table 3: Strength and deformation behaviour of the concretes investigated at the age of 28 d

Zement Cement CEM I	w/z _{plan} w/c _{sch}	Gesteins- körnung Aggregate	$\beta_{D,28}$		β_{SZ28}		$E_{b,28}$		$\mu_{b,28}$		$\epsilon_{b,u,28}$	
			N/mm ²	rel ¹⁾	N/mm ²	rel ¹⁾	N/mm ²	rel ¹⁾	-	rel ¹⁾	mm/m	rel ¹⁾
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
32,5 R	0,55	N	42,6	1,00	2,76	1,00	31.800	1,00	0,16	1,00	1,974	1,00
		BB	32,8	0,77	2,37	0,86	21.800	0,69	0,17	1,06	2,418	1,22
		ZB1	37,0	0,87	2,26	0,82	16.300	0,51	0,17	1,06	3,521	1,78
		BZK1	35,1	0,82	2,68	0,97	19.700	0,62	0,18	1,13	2,586	1,31
		BZK2	35,6	0,84	2,65	0,96	20.600	0,65	0,18	1,13	2,599	1,31
		ZB2	29,8	0,70	2,51	0,91	16.000	0,50	0,18	1,13	2,096	1,06
		NBZK	34,9	0,82	2,17	0,79	25.800	0,81	0,16	1,00	2,053	1,04
	0,75	N	25,3	1,00	1,94	1,00	n. b.	-	n. b.	-	n. b.	-
		ZB1	20,8	0,82	1,67	0,86	n. b.	-	n. b.	-	n. b.	-
		BZK1	20,3	0,80	1,63	0,84	n. b.	-	n. b.	-	n. b.	-
42,5 R	0,33	N	82,5	1,00	n. b.	-	37.500	1,00	0,17	1,00	2,181	1,00
		BB	65,9	0,80	n. b.	-	26.300	0,70	0,17	1,00	2,485	1,14
		ZB1	64,2	0,78	n. b.	-	19.900	0,53	0,19	1,12	3,176	1,46
		BZK1	65,6	0,80	n. b.	-	23.400	0,62	0,19	1,12	2,706	1,24
		BZK2	67,1	0,81	n. b.	-	25.700	0,69	0,18	1,06	2,744	1,26
		ZB2	57,2	0,69	n. b.	-	19.900	0,53	0,20	1,18	2,983	1,37

¹⁾ Relativwert bezogen auf den entsprechenden Beton mit Rheinkiesand N
Value relative to the corresponding concrete with Rhine sand and Rhine gravel N

w/z_{plan}: Planmäßiger Wasserzementwert

w/c_{sch}: Scheduled water cement ratio

n.b.: nicht bestimmt / not determined

$\beta_{D,28}$: Druckfestigkeit, Würfel: Kantenlänge 150 mm
Compressive strength, cubes 150 mm

β_{SZ28} : Spaltzugfestigkeit, Würfel: Kantenlänge 150 mm
Splitting tensile strength, cubes 150 mm

$E_{b,28}$: Statischer E-Modul, Zylinder D/H = 150/300 mm
Static modulus of elasticity, cylinder D/H = 150/300 mm

$\mu_{b,28}$: Querdehnzahl

Poisson's ratio

$\epsilon_{b,u,28}$: Längsdehnung im Bruchzustand (last geregelt)

Ultimate longitudinal strain under compression (load controlled)

Tafel 4: Druckfestigkeit, E-Modul, gesamte offene Porosität, sowie Ergebnisse zum Kriechen und Schwinden untersuchter Betone mit Zement CEM I 32,5 R und einem planmäßigen Wasserzementwert $w/z_{\text{plan}} = 0,60$

Table 4: Compressive strength, modulus of elasticity, total open porosity, creep and shrinkage of the concretes investigated with CEM I 32,5 R cement and a scheduled w/c value of 0.60

Gesteinskörnung Aggregate	$\beta_{D,28}$		$E_{b,28}^*$	$W_{v,d}$		$\epsilon_{s,\infty}$	$\epsilon_{k,\infty}$	$\varphi_{k,\infty}$	$(\epsilon_k/\sigma_{k,\infty})$
	N/mm ²	rel ¹⁾	N/mm ²	Vol.-%	rel ¹⁾	mm/m		-	$10^6 \cdot 1/(N/mm^2)$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
N	35,0	1,00	31.900	15,9	1,00	0,50	1,022	3,015	95
ZB2	26,6	0,76	17.300	34,1	2,14	0,90	0,978	2,017	116
BZK1	31,2	0,89	19.500	25,6	1,61	0,83	1,292	3,182	164
KN	23,3	0,67	n. b.	24,4	1,53	0,77	n. b.	n. b.	n. b.
NBZK	30,1	0,86	23.700	18,4	1,16	0,63	0,977	2,824	119

¹⁾ Relativwert bezogen auf den entsprechenden Beton mit Rheinkies-sand N
Value relative to the corresponding concrete with Rhine sand and Rhine gravel N
 n.b.: nicht bestimmt / not determined
 $\beta_{D,28}$: Druckfestigkeit im Alter von 28 d, Würfel: Kantenlänge 150 mm
Compressive strength at the age of 28 d, cubes 150 mm
 $E_{b,28}^*$: Statischer E-Modul im Alter von 28 d, Zylinder D/H = 150/300 mm – aus Kriechversuchen
Static modulus of elasticity at 28 d, cylinder D/H = 150/300 mm - from creep tests
 $W_{v,d}$: Gesamte offene Porosität im Alter von 28 d
Total open porosity at the age of 28 d

$\epsilon_{s,\infty}$: Rechnerisches Endschwindmaß auf der Basis von Messwerten bis rd. 450 d und 590 d nach Luftlagerung
Calculated ultimate shrinkage on the basis of data up to 450 d and 590 d after air storage
 $\epsilon_{k,\infty}$: Rechnerisches Endkriechmaß auf der Basis von Messwerten bis rd. 430 d und 570 d nach Belastung
Calculated final creep value on the basis of data up to 430 d and 570 d after loading
 $\varphi_{k,\infty}$: Rechnerische Endkriechzahl
Calculated ultimate coefficient of creep
 $(\epsilon_k/\sigma_{k,\infty})$: Rechnerisches spezifisches Endkriechmaß
Calculated ultimate specific creep value

ner mittleren Kornrohddichte des Gesteinskörnungsgemisches 0/16 mm von rd. 2,0 kg/dm³, an Würfeln mit einer Kantenlänge von 150 mm Betondruckfestigkeiten bis zu rd. 57 N/mm² (Druckfestigkeitsklasse C45/55 nach DIN EN 206-1) erreicht werden (Tafel 3). Bei ansonsten identischer Betonzusammensetzung betrug die maximale Abnahme der Druckfestigkeit im Vergleich zu einem Beton mit Rheinkies sand rd. 30 %.

Die an den hier untersuchten Betonen mit rezyklierten Gesteinskörnungen ermittelten Spaltzugfestigkeiten waren durchweg geringer als die der ansonsten identisch zusammengesetzten Betone mit Rheinkies sand. Die Ergebnisse zeigen, dass bei Verwendung von 100 Vol.-% rezyklierten Gesteinskörnungen > 2 mm mit einer Kornrohddichte von bis zu rd. 1,6 kg/m³ und Rheinsand 0/2 mm (Sieblinie A/B 16) bei ansonsten identischer Betonzusammensetzung mit einer Verringerung der Spaltzugfestigkeit bis zu 20 % zu rechnen ist. Die Spaltzugfestigkeiten dieser Betone liegen damit bei gleicher Druckfestigkeit im unteren Erfahrungsbereich von Normalbetonen.

Statischer E-Modul

Unter Verwendung der hier eingesetzten rezyklierten Gesteinskörnungen verringerten sich die Druck-E-Moduln im Alter von 28 Tagen im Vergleich zu den entsprechenden Betonen mit Rheinkies/-sand – weitgehend unabhängig vom Wasserzementwert – um bis zu rd. 50 %. Bild 2 zeigt den Zusammenhang zwischen dem statischen E-Modul und der Kornrohddichte der verwendeten Gesteinskörnung.

Bei Verwendung von Gemischen aus natürlichen und rezyklierten Gesteinskörnungen > 2 mm mit einer mittleren Kornrohddichte > 2,4 kg/dm³ können nach diesen Ergebnissen Betone hergestellt werden, die bez. des statischen E-Moduls in der Schwankungsbreite von Betonen nach DIN 1045:1988-07 (ohne Leichtbeton) liegen, wenn man eine Schwankungsbreite der E-Moduln von Normalbeton mit natürlichen Gesteinskörnungen bis zu ± 35 % berücksichtigt (vgl. z.B. [15]). Bei der Bemessung von Stahlbetonbauteilen nach DIN 1045 wird der E-Modul zum Nachweis der Durchbiegung unter Gebrauchslast verwendet. Dabei sind, „wenn genauere Angaben nicht erforderlich sind“, die Rechenwerte nach Tafel 11 der DIN 1045 zu verwenden. Bei Verwendung rezyklierter Gesteinskörnungen ist grundsätzlich mit einem, im Vergleich zu Betonen mit Rheinkies sand, verringerten E-Modul zu rechnen, der – falls nötig – im Rahmen einer Eignungsprüfung ermittelt werden sollte.

Unter Einbezug der in den folgenden Abschnitten dargestellten weiteren Betoneigenschaften wurde festgestellt, dass der statische

ponenten made with recycled aggregates are also to be designed in accordance with the regulations given in DIN 1045. The static modulus of elasticity was therefore the command variable in the context of the investigations carried out.

Creep and shrinkage

When the specific creep is examined it can be seen that if recycled aggregates > 2 mm are used the creep is increased compared with the use of Rhine sand and Rhine gravel. If the use of recycled aggregates is limited to the maximum levels determined in the “Static modulus of elasticity” section then no additional restriction will arise from the “Creep” criterion.

Figure 3 shows the change in the shrinkage of concretes with time. There are differences not only in the extent of the shrinkage but also in its development with time. The concrete made with Rhine sand and Rhine gravel N shows the typical shrinkage behaviour pattern of a concrete made with dense normal aggregate. A

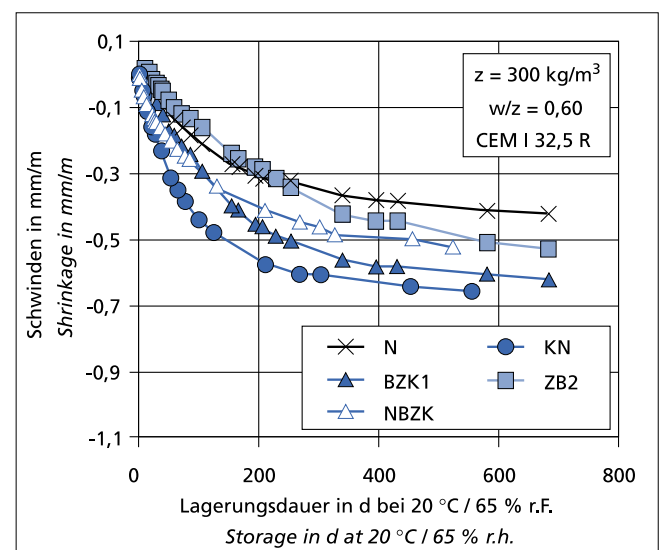


Bild 3: Zeitliche Entwicklung der Schwinddehnungen der Betone mit und ohne rezyklierte Gesteinskörnungen; Beginn der Luftlagerung: 7 d
Figure 3: Time-dependent shrinkage of concretes with and without recycled aggregates; start of air storage: 7 d

E-Modul der Kennwert ist, der die Verwendung rezyklierter Gesteinskörnungen aus Beton, Mauerziegeln und Kalksandstein maßgeblich nach oben begrenzt, wenn die Bemessung von Betonbauteilen nach den in DIN 1045 getroffenen Regeln auch für Beton mit rezyklierten Gesteinskörnungen durchgeführt werden soll. Der statische E-Modul des Betons stellte daher im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen die Leitgröße dar.

Kriechen und Schwinden

Betrachtet man das spezifische Kriechmaß, so ist zu erkennen, dass sich das Kriechen bei Verwendung rezyklierter Gesteinskörnungen > 2 mm im Vergleich zu Rheinkies sand grundsätzlich vergrößert. Wird die Verwendung der rezyklierten Gesteinskörnungen auf die im Abschnitt „Statischer E-Modul“ ermittelten maximalen Gehalte begrenzt, ergibt sich keine zusätzliche Einschränkung aus dem Kriterium „Kriechen“.

Bild 3 zeigt die zeitliche Entwicklung des Schwindens der Betone. Neben der Größe der Dehnungen ist hier insbesondere auch ihre zeitliche Entwicklung unterschiedlich. Der Beton mit Rheinkies sand N zeigt den typischen Schwindverlauf eines Betons mit dichter normaler Gesteinskörnung. Nach rd. einem Jahr wurde eine Dehnung von rd. 0,40 mm/m ermittelt. Aus dem zeitlichen Verlauf der Schwinddehnungen ergab sich für diesen Beton ein rechnerisches Endschwindmaß $\epsilon_{\infty} = 0,50$ mm/m. Bis zum Alter von rd. 220 Tagen nach Beginn der Luftlagerung wies der Beton mit 100 Vol.-% Ziegelbruch ZB2 > 2 mm geringere Schwinddehnungen als der Nullbeton N auf. Zu diesem Zeitpunkt erreichten die Schwinddehnungen des Betons mit ZB2 die Werte des Betons mit Rheinkies sand N und stiegen danach stärker an. Bei einer Messdauer von 424 Tagen nach Beginn der Luftlagerung wurde eine Schwinddehnung von 0,45 mm/m ermittelt. Zu diesem Zeitpunkt schien der Schwindverlauf bereits in eine Horizontale überzugehen. Die Schwinddehnungen nahmen jedoch mit zunehmender Lagerungszeit nochmals deutlich zu. Auf der Grundlage der vorliegenden Ergebnisse würde sich ein Endschwindmaß von rd. 0,9 mm/m ergeben. Die Recyclingbetone mit den Gesteinskörnungen BZK1 und NBZK wiesen durchweg höhere Werte auf als der Beton mit Rheinkies sand. Für diese Betone ergeben sich rechnerische Endschwindwerte von 0,83 mm/m für BZK1 und 0,63 mm/m für NBZK. Auffällig war auch der Schwindverlauf des Betons mit 71 Vol.-% Kalksandsteinbruch > 2 mm (KN). Die Schwinddehnungen dieses Betons lagen von Beginn an deutlich über denen aller übrigen Betone. Nach rd. 300 Tagen Luftlagerung ging der Schwindverlauf jedoch annähernd in eine Horizontale über und es ergibt sich aufgrund des bis zum Alter von rd. 450 Tagen ermittelten Schwindverlaufs ein rechnerisches Endschwindmaß von 0,77 mm/m.

Bild 4 zeigt die zu unterschiedlichen Zeitpunkten ermittelten Schwinddehnungen sowie die aus dem Schwindverlauf ermittelten Endwerte in Abhängigkeit des Beton-E-Moduls, der, wie gezeigt, von der Kornröhdichte der Gesteinskörnung abhängig ist. Der Schwindverlauf der Betone (Bild 3) und die Abhängigkeit der Schwinddehnungen vom Anteil schwindrelevanter Poren sowie vom E-Modul des Betons können wie folgt beschrieben bzw. interpretiert werden.

Die erzeugten Schwinddehnungen sind zunächst (bis zum Alter von 200 Tagen nach Luftlagerung) von der Austrocknung der schwindrelevanten Poren abhängig. Bei dem Beton mit Ziegelbruch ZB2 treten dabei geringere Dehnungen auf als bei dem Beton mit Rheinkies sand. Dies kann damit erklärt werden, dass der Ziegelbruch selbst nicht bzw. nur sehr wenig schwindet und die schwindrelevanten Poren des Zementsteins aufgrund des nachgelieferten Wasserangebotes aus dem Ziegelbruch noch nicht ausgetrocknet sind. Die Auswertung niederländischer Versuchsergebnisse in [16] hatte bereits darauf hingedeutet, dass bei Beton mit Ziegelbruch als Gesteinskörnung nach über einem Jahr noch eine Zunahme des Schwindens als Folge der Wasserabgabe aus der Gesteinskörnung (innere Nachbehandlung) zu erwarten ist und das Schwindmaß im Vergleich zu ansonsten identisch zusammengesetzten Betonen mit Rheinkies sand als Folge der geringeren Steifigkeit des Ziegelbruchs um 20 % bis 60 % größer sein kann. Die Tatsache, dass der Beton mit Ziegelbruch ZB2 ab einem Alter von rd.

shrinkage of about 0.40 mm/m was measured after about one year. A calculated ultimate shrinkage $\epsilon_{\infty} = 0.50$ mm/m for this concrete was obtained from the behaviour with time of the shrinkage. Up to an age of about 220 days after the start of storage in air the concrete made with 100 vol.% ZB2 crushed clay brick > 2 mm exhibited less shrinkage than the reference concrete N. At this point the shrinkage of the concrete made with ZB2 reached the same value as the concrete N made with Rhine sand and Rhine gravel, after which it increased more sharply. A shrinkage of 0.45 mm/m was measured at 424 days after the start of air storage. At this time the shrinkage behaviour pattern already appeared to have become horizontal. However, the shrinkage values increased again significantly with increasing storage time. An ultimate shrinkage of about 0.9 mm/m would be obtained on the basis of the available results. The recycled concretes made with the aggregates BZK1 and NBZK all showed higher values than the concrete made with Rhine sand and Rhine gravel. Calculated ultimate shrinkage values of 0.83 mm/m for BZK1 and 0.63 mm/m for NBZK were obtained for these concretes. The shrinkage behaviour pattern of the concrete made with 71 vol.% crushed sand-lime brick > 2 mm (KN) was striking. From the beginning the shrinkage values of this concrete were significantly higher than those of all the other concretes. However, after about 300 days' air storage the shrinkage curve became approximately horizontal and a calculated ultimate shrinkage of 0.77 mm/m was obtained from the shrinkage behaviour pattern determined up to the age of about 450 days.

Figure 4 shows the shrinkage values determined at the different times as well as the ultimate values determined from the shrinkage curve as a function of the concrete modulus of elasticity which, as shown, is dependent on the apparent density of the aggregate. The shrinkage curves of the concretes (Figure 3) and the dependence of the shrinkage on the proportion of shrinkage-relevant pores as well as on the modulus of elasticity of the concrete can be described and interpreted as follows.

Initially (up to 200 days after start of air storage), the shrinkage values produced are dependent on the drying out of the shrinkage-relevant pores. Smaller shrinkage values occur with the concrete made with ZB2 crushed clay brick than with the concrete made with Rhine sand and Rhine gravel. This can be explained by the fact that the crushed clay brick itself shrinks very little or not at all and the shrinkage-relevant pores of the hardened cement paste are not yet dried out because of the water provided subsequently from the crushed brick. Evaluation of Dutch test results in [16] had already indicated that in concrete made with crushed clay brick as ag-

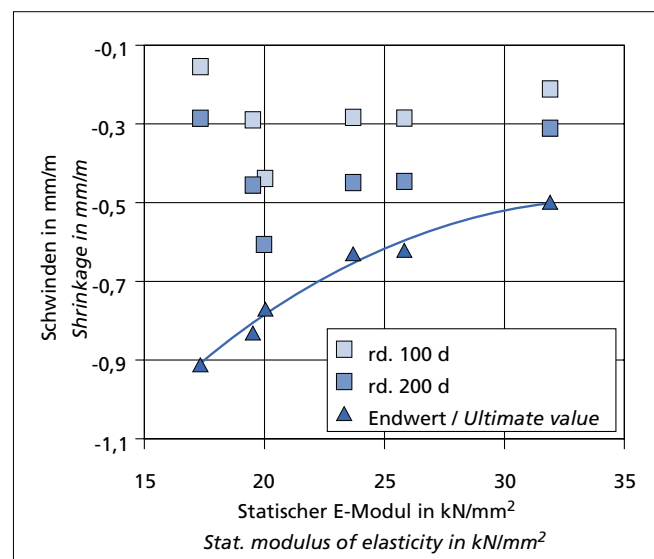


Bild 4: Zusammenhang zwischen dem Schwinden und dem E-Modul des Betons ($\rho = 300 \text{ kg/m}^3$, $w/z = 0,60$, CEM I 32,5 R)
Figure 4: Relationship between shrinkage and modulus of elasticity of concrete ($\rho = 300 \text{ kg/m}^3$, $w/c = 0.60$, CEM I 32,5 R)

200 Tagen größere Dehnungen aufwies als der Beton mit Rheinkies sand, kann darauf zurückgeführt werden, dass der Ziegelbruch aufgrund seiner geringeren Steifigkeit (E-Modul) dem verzögert einsetzenden Schwinden der Zementsteinmatrix einen geringeren Widerstand entgegensetzt. Aufgrund des Schwindverlaufes ist davon auszugehen, dass auch die Schwinddehnungen der übrigen Betone mit rezyklierten Gesteinskörnungen zumindest erreicht, wahrscheinlich sogar überschritten werden. Bei dem Beton mit der Gesteinskörnung BZK1 sind die Dehnungen durchgängig größer als beim Beton mit Rheinkies sand, da der Beton durch die Verwendung von Beton- und Kalksandsteinbruch zusätzliche schwindrelevante Poren enthält und die rezyklierte Gesteinskörnung eine geringere Steifigkeit aufweist. Das Schwindverhalten des Betons mit Kalksandsteinbruch unterschied sich bis zum Alter von rd. 400 Tagen deutlich von dem der übrigen Betone. Es ist bekannt, dass Kalksandsteine in erheblichem Maße Volumenänderungen infolge Carbonatisierung aufweisen können. Wie die durchgeführten Carbonatisierungsversuche zeigen, wies dieser Beton relativ hohe Carbonatisierungstiefen auf. Mit fortschreitender Austrocknung nähern sich die Schwinddehnungen dieses Betons den Verformungen des Betons mit der Gesteinskörnung BZK1 weiter an. Dies verwundert nicht, da die Steifigkeiten der verwendeten Gesteinskörnungen aufgrund der annähernd identischen Kornrohddichten vergleichbar sein dürften.

Aus den ermittelten Werten ist abzuleiten, dass – analog zum E-Modul – eine mittlere Kornrohddichte von rd. $2,4 \text{ kg/m}^3$ als „Grenzwert“ angesehen werden kann, bei dessen Unterschreitung die Endschwindmaße größer sind als bei praxisüblichen Normalbetonen.

4.2.4 Dauerhaftigkeit

Als Parameter zur Beschreibung des Einflusses rezyklierter Gesteinskörnungen auf die Dauerhaftigkeit des Betons wurden die

- Carbonatisierung,
- der Frostwiderstand sowie der
- Widerstand des Betons gegen das Eindringen von Chloriden (Migrationsversuch)

untersucht.

Außerdem wurde die Porengrößenverteilung mit Hilfe der Quecksilberdruckporosimetrie ermittelt. Diese Untersuchungen wurden an Betonen mit Zement CEM I 32,5 R und einem planmäßigen Wasserzementwert $(w/z)_{\text{plan}} = 0,60$ sowie teilweise mit einem Zement CEM III/B 42,5 bei einem planmäßigen Wasserzementwert $(w/z)_{\text{plan}} = 0,45$ durchgeführt. Tafel 5 gibt einen Überblick der erzielten Ergebnisse.

Carbonatisierung

Das CO_2 aus der Luft dringt durch Diffusionsvorgänge in den Beton ein. Daher sind besonders die Poren in Zementstein und den Gesteinskörnungen für die Carbonatisierungsgeschwindigkeit maßgebend, in denen dieser Transportprozess stattfinden kann. Da bei der Diffusion von Gasen in den Kapillarporen poröser Festkörper die Transportprozesse in Poren $< 100 \text{ nm}$ nicht mehr den Fick'schen Gesetzen gehorchen [17], wurde angenommen, dass der für das Eindringen von CO_2 relevante Porenanteil der Porenanteil $> 100 \text{ nm}$ ist. Durch die Verwendung der eingesetzten porösen rezyklierten Gesteinskörnungen wurde dieser Porenanteil im Vergleich zu Beton mit Rheinkies sand z.T. deutlich erhöht. Bild 5 zeigt den Zusammenhang zwischen diesem Porenanteil, ermittelt mit der Quecksilberdruckporosimetrie, und der Carbonatisierungstiefe der Betone nach einem Jahr. Auffällig ist der Wert für den Beton mit der Gesteinskörnung KN (Kalksandsteinbruch), der einen Porenanteil $> 100 \text{ nm}$ von rd. 11 Vol.-% aufweist. In diesem Beton carbonatisierte ebenfalls die Gesteinskörnung aus Kalksandstein. Die Carbonatisierung von Beton unter Verwendung rezyklierter Gesteinskörnungen $> 2 \text{ mm}$ aus Beton, Mauerziegeln und Kalksandstein wurde damit z.T. deutlich von der Porosität der rezyklierten Gesteinskörnungen beeinflusst. In den durchgeführten Versuchen wurden an Beton unter Verwendung von 65 Vol.-% rezyklierter Gesteinskörnung $> 2 \text{ mm}$ (bezogen auf die gesamte Gesteinskörnung) im Vergleich zu einem ansonsten identisch zusammengesetzten Beton mit Rheinkies sand durchweg höhere Carbonatisierungstiefen ermittelt. Wird die Verwendung der rezyklierten Gesteinskörnungen auf die aus dem statischen E-Modul des Betons abgeleiteten maximalen

agregate an increase in shrinkage after one year is still to be expected as a result of the release of water from the aggregate (internal curing); the shrinkage can be 20 % to 60 % greater than with concretes of otherwise identical composition made with Rhine sand and Rhine gravel because the crushed brick is less stiff. The fact that the concrete made with ZB2 crushed clay bricks showed a greater shrinkage from an age of about 200 days than the concrete made with Rhine sand and Rhine gravel can be attributed to the fact that, because it is less stiff (modulus of elasticity), the crushed brick has a lower resistance to the delayed shrinkage of the hardened cement paste matrix. On the basis of the shrinkage behaviour it can be assumed that the shrinkage values of the other concretes made with recycled aggregates are at least reached and probably exceeded. With the concrete made with BZK1 aggregates the shrinkage values are all larger than with the concrete made with Rhine sand and Rhine gravel because the concrete contains additional shrinkage-relevant pores due to the use of crushed concrete and sand-lime bricks and the recycled aggregate is less stiff. Up to the age of about 400 days the shrinkage behaviour of the concrete made with crushed sand-lime brick differed significantly from that of the other concretes. It is known that sand-lime bricks can exhibit substantial changes in volume as a result of carbonation. The carbonation trials carried out showed that this concrete exhibited relatively large depths of carbonation. With progressive drying out the shrinkage values of this concrete continued to come closer to the deformation of the concrete made with BZK1 aggregate. This is not surprising as the stiffnesses of the aggregates used may well be comparable due to the almost identical apparent densities.

From the values determined it can be deduced that – analogous to the modulus of elasticity – an average apparent density of about 2.4 kg/m^3 can be regarded as the “limiting value”, and if the density falls below this value the ultimate shrinkage will be greater than with the normal concretes used in practice.

4.2.4 Durability

The following parameters for describing the influence of recycled aggregates on the durability of the concrete were examined:

- carbonation,
- freeze-thaw resistance and
- resistance of the concrete to penetration by chlorides (migration test).

The pore size distribution was also determined using mercury intrusion porosimetry. These investigations were carried out on concretes made with CEM I 32,5 R cement and a scheduled water/cement ratio of 0.60 as well as in some cases with a CEM III/B 42,5 cement with a scheduled water/cement ratio of 0.45. The results obtained are summarized in Table 5.

Carbonation

CO_2 from the air penetrates into the concrete by diffusion processes. The pores in the hardened cement paste and the aggregate in which this transport process can take place are therefore particularly crucial for the rate of carbonation. In the diffusion of gases in the capillary pores of porous solid bodies the transport processes in pores $< 100 \text{ nm}$ no longer obey Fick's law [17], so it is assumed that the pore fraction relevant to the penetration of CO_2 is the pore fraction $> 100 \text{ nm}$. Due to the use of porous recycled aggregates used this pore fraction is in some cases significantly increased when compared to concrete made with Rhine sand and Rhine gravel. Figure 5 shows the relationship between this pore fraction, determined by mercury intrusion porosimetry, and the depths of carbonation in the concretes after one year. The value for the concrete made with KN aggregate (crushed sand-lime brick), which has a pore fraction $> 100 \text{ nm}$ of about 11 vol.%, is conspicuous. The sand-lime brick aggregate in this concrete is also carbonated. The carbonation of concrete using recycled aggregates $> 2 \text{ mm}$ made of concrete, clay bricks and sand-lime bricks was therefore in some cases substantially affected by the porosity of the recycled aggregates. Greater depths of carbonation were found in these trials for all concretes using 65 vol.% recycled aggregate $> 2 \text{ mm}$ (relative to the total aggregate mix) compared with a concrete of otherwise identical composition made with Rhine sand and Rhine

Tafel 5: Mittlere und maximale Carbonatisierungstiefe, Grenzradius der Quecksilberdruckporosimetrie, Ergebnisse der Frostversuche und Chlorid-Migrationskoeffizienten der untersuchten Betone mit CEM I 32,5 R und $w/z_{\text{plan}} = 0,60$

Table 5: Mean and maximum carbonation depth, threshold radius of the Hg-porosimetry, results of the freeze-thaw tests and chloride migration coefficients for the concrete mixes investigated, with CEM I 32,5 R and a scheduled $w/c = 0.60$

Gesteinskörnung Aggregate	d_c	d_{c2}	Grenz- radius Threshold radius	Frostprüfung / Freeze-thaw test						$D_{Cl,M}$
				Würfelverfahren Cube test		CF-/CIF-Verfahren CF-/CIF test				
				Abwitterung / Scaling				Abfall dyn. E / Decrease in dyn. E		
				nach / after						
				50	100	28	56	28	56	
				Frosttauwechseln / Freeze-thaw cycles						
mm		μm	M.-%		g/m^2		%		$10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
N	6,6	7,7	0,16	0,48	1,28	136	451	~ 0	16	18,5
N ¹⁾	n. b.	n. b.	0,04	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	0,45
ZB2	9,6	10,9	0,38	3,53	31,7	236	484	2	65	26,0
BZK1	7,7	8,5	0,95	0,63	2,06	270	476	~ 0	~ 0	27,1
KN	8,8	10,8	1,11	0,25	0,83	108	869	~ 0	~ 0	31,4
KN ¹⁾	n. b.	n. b.	0,08	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	5,71
NBZK	7,2	8,7	0,40	0,33	0,95	200	873	7	23	18,6

d_c : Mittlere Carbonatisierungstiefe nach 365 d / Mean carbonation depth after 365 d
 d_{c2} : Maximale Carbonatisierungstiefe nach 365 d / Maximum carbonation depth after 365 d
 $D_{Cl,M}$: Migrationskoeffizient im Alter von 28 d / Migration coefficient at the age of 28 d
¹⁾ CEM II/B 42,5 und $w/z_{\text{plan}} = 0,45$ / $w/c_{\text{scheduled}} = 0,45$

Gehalte begrenzt, ergibt sich aus dem Kriterium „Carbonatisierung“ keine zusätzliche Einschränkung.

Frostwiderstand

Bis auf den Ziegelbruch ZB2 waren alle rezyklierten Gesteinskörnungen nach DIN 4226-1:1983-04 als „vF“ einzustufen und somit nur in Beton einsetzbar, der keinen Frosteinwirkungen ausgesetzt ist. Der Ziegelbruch ZB2 wies dagegen „eF- bzw. eFT-Qualität“ auf und könnte nach diesen Kriterien in Beton mit hohem Frost- und hohem Frosttausalz-widerstand verwendet werden. Wie die Bilder 6 und 7 zeigen, wurden dagegen in den Betonversuchen bis auf den Beton unter Verwendung von 100 Vol.-% Ziegelbruch ZB2 in der Korngruppe 2/16 mm nur geringe Abwitterungen und ein geringer Abfall des dynamischen E-Moduls ermittelt. Die Frostprüfungen der DIN 4226 geben also bei solchen „Negativergebnissen“ keinerlei Hinweise auf den Frostwiderstand des Betons. Bestehen die Gesteinskörnungen die Gesteinskörnungsprüfung, so kann

gravel. However, if the use of recycled aggregates is limited to the maximum levels derived from the static modulus of elasticity of the concrete then the “Carbonation” criterion does not result in any additional restriction.

Freeze-thaw resistance

Except for the ZB2 crushed clay bricks all recycled aggregates were graded as “vF” as defined in DIN 4226-1:1983-04 and can therefore only be used in concrete which is not exposed to any frost action. The ZB2 crushed brick, on the other hand, satisfied the “eF or eFT grade” and on this criterion could be used in concrete with high resistance to freeze-thaw and to freeze-thaw with deicing salt. However, Figures 6 and 7 show that, with the exception of concrete using 100 vol.% ZB2 crushed brick in the particle size range 2/16 mm, only a small scaling loss and small drop in dynamic modulus of elasticity were determined in the concrete trials. Such “negative” results mean that the freeze-thaw tests in DIN

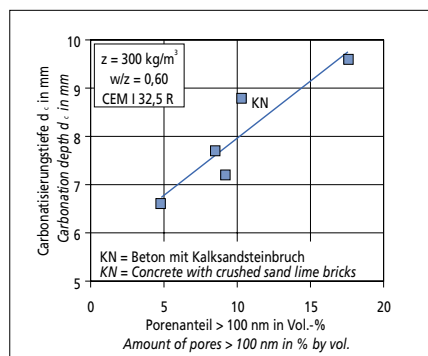


Bild 5: Mittlere Carbonatisierungstiefe der Betone im Alter von 365 d in Abhängigkeit von ihrem Porenanteil > 100 nm
Figure 5: Mean carbonation depth of the concretes at the age of 365 d as a function of the proportion of pores > 100 nm

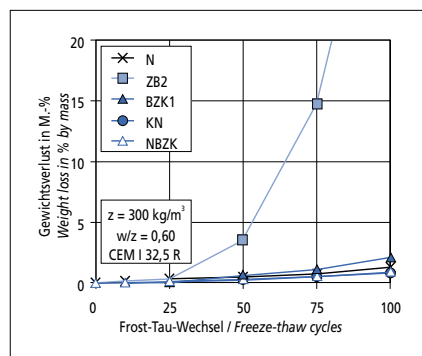


Bild 6: Gewichtsverlust in Abhängigkeit von der Anzahl der Frost-Tau-Wechsel – Frostprüfung nach dem Würfelverfahren
Figure 6: Weight loss as a function of the number of freeze-thaw cycles – Freeze-thaw test by the cube method

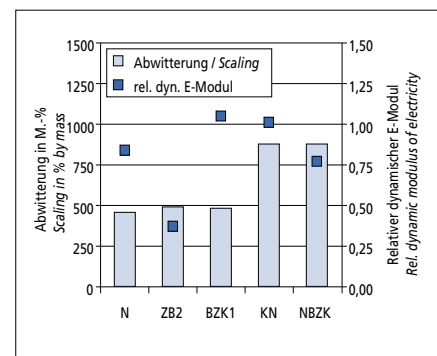


Bild 7: Abwitterung und relativer dynamischer E-Modul nach 56 Frost-Tau-Wechseln – Frostprüfung nach dem CIF-Verfahren ($z = 300 \text{ kg}/\text{m}^3$, $w/z = 0,60$, CEM I 32,5 R)
Figure 7: Scaling and relative dynamic modulus of elasticity of concrete after 56 freeze-thaw cycles – Freeze-thaw test by the CIF-test ($c = 300 \text{ kg}/\text{m}^3$, $w/c = 0.60$, CEM I 32,5 R)

nicht immer davon ausgegangen werden, dass mit keinerlei Schädigung des Betons infolge Frosteinwirkung zu rechnen ist, wie der Beton mit 100 Vol.-% Ziegelbruch ZB2 > 2 mm zeigt. Die vorliegenden Ergebnisse zum Frostwiderstand von Beton mit rezyklierten Gesteinskörnungen > 2 mm aus bis zu 100 Vol.-% Betonbruch, rd. 50 Vol.-% Mauerziegelbruch (ohne porosierte Ziegel) oder rd. 70 Vol.-% Kalksandsteinbruch bei Prüfung mit dem Würfelverfahren und/oder dem CIF-Test einen hohen Frostwiderstand aufweisen. Sie sind daher für eine Anwendung in Betonen geeignet, bei denen durchgängig eine hohe Sättigung erwartet wird. Die Verwendung von porosierten Ziegeln sollte mit Blick auf den Frostwiderstand des Betons eingeschränkt werden. Positive Ergebnisse liegen hier nur für eine Anwendung in den genannten Betonen bis zu einem Gehalt von 15 Vol.-%, bezogen auf den Gesteinskörnungsanteil 2/16 mm, vor.

Widerstand gegenüber dem Eindringen von Chloriden

Versuche zum Widerstand des Betons gegen das Eindringen von Chloriden wurden ebenfalls an den Betonen mit 300 kg/m³ CEM I 32,5 R und einem planmäßigen Wasserzementwert (w/z)_{plan} = 0,60 durchgeführt. Betone mit einem solchen Wasserzementwert dürfen planmäßig nicht unter Umgebungsbedingungen eingesetzt werden, bei denen das Risiko einer durch Chloride verursachten Bewehrungskorrosion gegeben ist. DIN 1045-2 fordert in solchen Bereichen einen Mindestzementgehalt von 300 kg/m³ bei einem höchstzulässigen Wasserzementwert von 0,55 für XS1 (Außenbauteile in Küstennähe) bzw. XD1 (Bauteile im Sprühnebelbereich von Verkehrsflächen). Da die hier durchgeführten Untersuchungen zu einer vergleichenden Bewertung im Verhältnis zu Beton mit Rheinkies sand führen sollten und die gegebene Mischungszusammensetzung der in DIN 1045-2 geforderten sehr ähnlich war, wurde darin jedoch kein grundsätzliches Problem gesehen. Die durchgeführten Versuche sollen eine erste Einschätzung ermöglichen, wie Betone mit rezyklierten Gesteinskörnungen im Hinblick auf ihren Widerstand gegen das Eindringen von Chloriden zu beurteilen sind.

In verschiedenen Untersuchungen zum Einfluss von Steinkohlenflugasche auf den Widerstand des Betons gegen das Eindringen von Chloriden konnte gezeigt werden, dass der Grenzzadius der mit der Quecksilberdruckporosimetrie ermittelten Porenradialverteilung ein aussagekräftiger Kennwert zur Beurteilung des Diffusionswiderstandes gegenüber Chloridionen sein kann. Der Grenzzadius charakterisiert, bei welchem Radius erstmals größere Mengen Quecksilber in die Probe eindringen. Man geht davon aus, dass bei dem zugehörigen Druck Quecksilber alle größeren Poren füllt. Deshalb ist dieser Radius ein Kennwert, der die Größe der Verbindungskanäle zwischen den größeren Poren gut charakterisiert. Unterhalb von diesem Grenzzadius liegt ein kontinuierliches Porennetz vor, das den kompletten Prüfkörper durchdringt. Die in Bild 8 dargestellten Ergebnisse aus [18] zeigen reine Portlandzementmischungen (graue Kreise) sowie Mischungen mit Steinkohlenflugasche und/oder Hüttensand in unterschiedlichen Anteilen unter Verwendung dichter Gesteinskörnungen. Enthalten Betone mit Portlandzement, wie bei den hier untersuchten Betonen mit (w/z)_{plan} = 0,60, rezyklierte Gesteinskörnungen, die zusätzlich transportrelevante Poren enthalten, so erhöht sich der Chlorid-Migrationskoeffizient weiter mit zunehmendem Grenzzadius der Betone. Der ermittelte Zusammenhang ist deutlich flacher. Während sich der Migrationskoeffizient im Zementstein durch die Verwendung von Flugasche teilweise um bis zu zwei Größenordnungen verringern kann, war durch den Einsatz rezyklierter Gesteinskörnungen bei (w/z)_{plan} = 0,60 demgegenüber eine Erhöhung in der Größenordnung von bis zu rd. 13 · 10⁻¹² m²/s festzustellen.

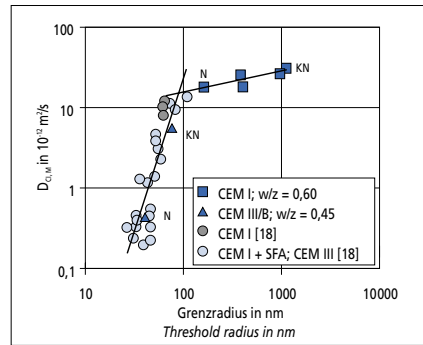


Bild 8: Zusammenhang zwischen dem Chlorid-Migrationskoeffizienten $D_{cl,M}$ und dem Grenzzadius der Porengrößenverteilung für Mörtel aus [18] sowie eigenen Betonen ohne und mit rezyklierten Gesteinskörnungen
Figure 8: Relationship between the chloride migration coefficient $D_{cl,M}$ and the threshold radius of the pore size distribution for mortars from [18] and for in-house concretes with and without recycled aggregates

4226 give absolutely no indication of the freeze-thaw resistance of the concrete. If the aggregates pass the aggregate test it can not always be assumed that no damage to the concrete can be expected as a result of the action of frost, as is demonstrated by the concrete made with 100 vol.% crushed clay bricks ZB2 > 2 mm. These results for the freeze-thaw resistance of concrete made with recycled aggregates have shown that concretes with recycled aggregates > 2 mm consisting of up to 100 vol.% crushed concrete, about 50 vol.% crushed clay bricks (without porous brick), or about 70 vol.% crushed sandlime bricks exhibit high freeze-thaw resistance in the test by the cube method and/or the CIF test. They are therefore suitable for use in concretes in which a high level of saturation is expected at all times. The use of porous bricks should be restricted with a view to the freeze-thaw resistance of the concrete. In this case positive results were obtained only for application

in the named concretes up to a content of 15 vol.% relative to the 2/16 mm aggregate fraction.

Resistance to penetration by chlorides

Investigations into the resistance of concrete to penetration by chlorides were also carried out on concretes with 300 kg/m³ CEM I 32,5 R and a scheduled water/cement ratio of 0.60. Concretes with this water/cement ratio are not permitted to be used in designs for conditions in which there is a risk of corrosion of the reinforcement by chlorides. In such areas DIN 1045-2 requires a minimum cement content of 300 kg/m³ with a maximum permissible water/cement ratio of 0.55 for XS1 (external components in coastal regions) and XD1 (components within the range of spray from traffic areas). The investigations carried out here were intended to lead to a comparative evaluation in relation to concrete made with Rhine sand and Rhine gravel and the specified mix composition was very similar to that required in DIN 1045-2, so no basic problem was anticipated. The trials carried out should facilitate an initial estimate as to how concretes with recycled aggregates should be assessed with respect to their resistance to penetration by chlorides.

In various investigations into the influence of coal fly ash on the resistance of the concrete to penetration by chlorides it was shown that the threshold radius of the pore size distribution determined by mercury intrusion porosimetry can be a meaningful parameter for assessing the resistance to diffusion of chloride ions. The threshold radius characterizes the radius at which fairly large quantities of mercury first penetrate into the sample. It is assumed that at the associated pressure all larger pores are filled with mercury. This radius is therefore a parameter which provides a good indication of the size of the linking channels between the larger pores. Below this threshold radius there is a continuous network of pores which penetrates the complete test piece. The results from [18] shown in Figure 8 show pure Portland cement mixtures (closed circles) as well as mixtures with coal fly ash and/or granulated blastfurnace slag in varying proportions using dense aggregates. If concretes made with Portland cement contain recycled aggregates which also contain transport-relevant pores, as with the concretes investigated here with (w/c)_{scheduled} = 0.60, then the chloride migration coefficient increases further with increasing threshold radius of the concretes. The relationship determined is significantly flatter. The migration coefficient in the hardened cement paste can be reduced in some cases by up to two orders of magnitude by using fly ash but, on the other hand, an increase of the order of magnitude of up to about 13 · 10⁻¹² m²/s was found as a result of the use of recycled aggregates with (w/c)_{scheduled} = 0.60. It is not surprising that the migration coefficient in this range is dependent to only a limited extent on the threshold radius. Pore radii between 0.5 µm and 10 µm (500 nm to 10000 nm) can be regarded as the upper

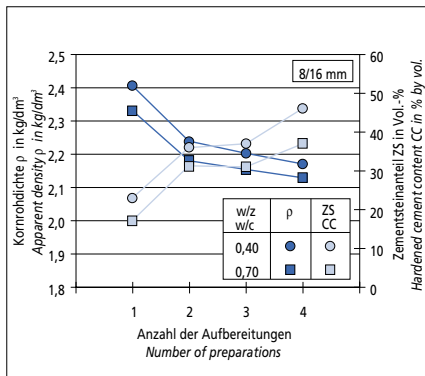


Bild 9: Kornrohddichte und Zementsteinanteil rezyklierter Gesteinskörnungen aus Betonsplitt bei mehrfacher Aufbereitung

Figure 9: Apparent density and hardened cement content of recycled concrete aggregates (RCA) after multiple recycling

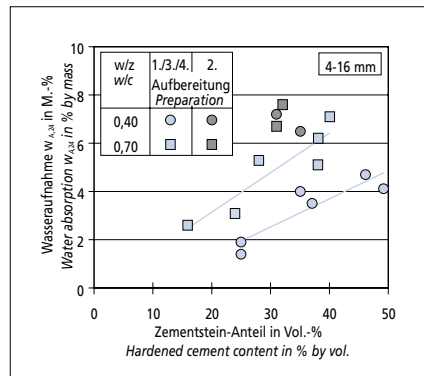


Bild 10: Wasseraufnahme in Abhängigkeit von dem Zementsteinanteil rezyklierter Gesteinskörnungen aus Betonsplitt > 4 mm

Figure 10: Water absorption as a function of the hardened cement content of recycled aggregate made from concrete chippings > 4 mm

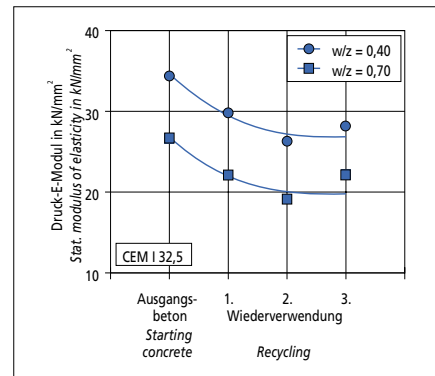


Bild 11: Entwicklung des statischen E-Moduls der Betone im Alter von 28 d in Abhängigkeit von der Anzahl der Aufbereitungen

Figure 11: Change of the static modulus of elasticity of concrete at 28 d as a function of the number of times it has been recycled

Dass der Migrationskoeffizient in diesem Bereich nur noch eingeschränkt vom Grenzradius abhängt, ist dabei nicht verwunderlich. Als Obergrenze für den transportrelevanten Kapillarporenraum sind Porenradien zwischen 0,5 μm und 10 μm (500 nm bis 10000 nm) anzusehen. Da die Grenzradien der Betone mit rezyklierten Gesteinskörnungen bei $(w/z)_{\text{plan}} = 0,60$ zwischen 0,38 μm und 1,11 μm (380 bis 1110 nm) lagen, wirkte sich die Erhöhung des Grenzradius nur noch geringfügig aus.

Eine deutliche Reduzierung der Migrationskoeffizienten ist bei Grenzradien < 0,1 μm (100 nm) feststellbar. Interessant war daher die Frage, wie sich eine Gefügeverdichtung der Matrix auswirken würde. Hierzu wurden Betone mit den Gesteinskörnungen N und KN in Kombination mit einem Hochofenzement CEM III/B 42,5 und einem planmäßigen Wasserzementwert $w/z_{\text{plan}} = 0,45$ hergestellt. Die Ergebnisse sind ebenfalls in Bild 8 dargestellt. Wie man erkennt, machte sich die Verdichtung der Matrix bei Verwendung der Gesteinskörnung KN zwar bemerkbar, im Vergleich zu dem Beton mit Rheinkiesand (N) war jedoch die Gesteinskörnung die bestimmende Größe.

4.3 Mehrfachrecycling von Beton

Zur Durchführung von Versuchen zur mehrfachen Aufbereitung und Wiederverwendung von Beton wurden u.a. Ausgangsbetone (AB) mit w/z -Werten zwischen 0,40 und 0,70 hergestellt (AB40, AB70). Die Betone wiesen unter Verwendung eines Zementes CEM I 32,5 R ein konstantes Gesteinskörnungsvolumen von 0,7 m^3 pro m^3 Beton Rheinkiesand (N) 0/16 mm im Sieblinienbereich A/B auf. Betonsplitt aus einem Beton mit einem w/z -Wert von 0,40 wurde bei jeder weiteren Verwendung wieder in einem Recycling-Beton (z.B. nach erster Wiederverwendung RB-1-40) mit diesem w/z -Wert eingesetzt. Hierdurch sollten entsprechende Randbereiche erfasst werden. Die Aufbereitung (Zerkleinerung) der hergestellten Betonprüfkörper (Zylinder und Balken) erfolgte jeweils im Alter von rd. 120 Tagen im Institut für Aufbereitung, Kokerei und Brikettierung der RWTH Aachen mit Hilfe eines Backenbrechers und eines Schlagbrechers.

Bild 9 zeigt die Kornrohddichten und den Zementsteinanteil bei der Aufbereitung der Betone mit Wasserzementwerten $w/z = 0,40$ und $w/z = 0,70$ gewonnenen rezyklierten Gesteinskörnungen nach der ersten bis vierten Aufbereitung des Betons für die Korngruppe 8/16. Nach der vierten Aufbereitung lagen die Kornrohddichten als Folge der Zunahme des Zementsteingehaltes bis zu 13 % niedriger als die der ursprünglichen rezyklierten Gesteinskörnungen. Insgesamt war festzustellen, dass auch nach viermaliger Aufbereitung von Beton die Kornrohddichten oberhalb des in der Richtlinie „Beton mit rezykliertem Zuschlag“ [19] festgelegten unteren Grenzwertes von 2,0 kg/dm^3 für die mittlere Kornrohddichte rezyklierter Gesteinskörnungen aus Betonsplitt und Betonbrechsand lagen und die Gesteinskörnungen somit zur Herstellung von Beton verwendet werden könnten.

limit for the transport-relevant capillary pore void. The threshold radii of the concretes with recycled aggregates with $(w/c)_{\text{scheduled}} = 0,60$ lay between 0,38 μm and 1,11 μm (380 to 1110 nm) so the increase in threshold radius had only a slight affect.

A significant reduction in the migration coefficient can be detected at threshold radii < 0,1 μm (100 nm). The effect of consolidating the matrix microstructure therefore posed an interesting question. For this purpose concretes were produced with the aggregates N and KN in combination with a CEM III/B 42,5 blast-furnace cement and a scheduled water/cement ratio of 0,45. The results are also shown in Figure 8. As can be seen, the consolidation of the matrix when using aggregate KN was in fact noticeable but when compared to the concrete made with Rhine sand and Rhine gravel (N) the aggregate was in fact the determining variable.

4.3 Multiple recycling of concrete

Original concretes (AB) with w/c between 0.40 and 0.70 (AB40, AB70) were produced for carrying out investigations into the multiple processing and re-use of concrete. The concretes had a constant aggregate volume of 0.7 m^3 of 0/16 mm Rhine sand and Rhine gravel (N) of the grading curve range A/B per m^3 concrete when using CEM I 32,5 R cement. Concrete chippings made from a concrete with a w/c of 0.40 were used for each further use in a recycled concrete (e.g. after first re-use RB-1-40) with this w/c . This was intended to cover corresponding boundary regions. In each case the concrete test pieces produced (cylinders and beams) were processed (comminuted) at the age of 120 days at the Institut für Aufbereitung, Kokerei und Brikettierung at the Aachen University of Technology using a jaw crusher and an impact crusher.

Figure 9 shows the apparent densities and the proportion of hardened cement paste of the recycled aggregates recovered during the processing of concretes with water/cement ratios $w/c = 0,40$ and $w/c = 0,70$ after the first to the fourth processing of the concrete for the particle size range 8/16. After the fourth processing the apparent densities were up to 13 % lower than that of the originally recycled aggregates as a result of the increase in the content of hardened cement paste. As a whole it was established that even after the concrete had been processed four times the apparent densities lay above the lower limit of 2.0 kg/dm^3 for the average apparent density of recycled aggregates made from concrete chippings and concrete crusher sand as laid down in the code of practice “Concrete with recycled aggregate” [19], so the aggregates can be used as aggregates for producing concrete.

The results of the strength and deformation characteristics as well as the total open porosities of the concretes investigated are given in Table 6. Figure 11 shows examples of the change in the static modulus of elasticity of concrete as a function of the number of times it has been recycled. Elastic moduli which were about 12 % or 14 % lower than in the original concretes were determined after the third re-use. The classification of these values in compar-

Tafel 6: Mehrfachrecycling: Ergebnisse zum Festigkeits- und Verformungsverhalten sowie der gesamten offenen Porosität der untersuchten Betone
Table 6: Multiple recycling: Strength and deformation behaviour as well as total open porosity of the concretes investigated

Beton Concrete	Rohdichte ¹⁾ Density ¹⁾		$\beta_{D,28}$		$E_{b,28}$		$\mu_{b,28}$		$\epsilon_{b,u,28}$		$W_{v,d}$	
	kg/dm ³	rel ²⁾	N/mm ²	rel ²⁾	N/mm ²	rel ²⁾	–	rel ²⁾	mm/m	rel ²⁾	Vol.-%	rel ²⁾
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
AB40	2,34	1,0	59,0	1,0	32.900	1,0	0,18	1,0	2,094	1,0	14,9	1,0
AB70	2,30	1,0	30,0	1,0	25.200	1,0	0,14	1,0	1,945	1,0	16,8	1,0
RB-1-40	2,30	0,98	57,9	0,98	29.400	0,89	0,19	1,06	2,681	1,28	16,0	1,07
RB-1-70	2,21	0,96	28,2	0,94	22.500	0,89	0,16	1,14	2,305	1,19	19,0	1,13
RB-2-40	2,25	0,96	44,9	0,76	26.400	0,80	0,18	1,00	2,667	1,27	21,3	1,43
RB-2-70	2,14	0,93	19,4	0,65	19.400	0,77	0,18	1,29	2,315	1,19	24,5	1,46
RB-3-40	2,22	0,95	59,2	1,00	28.200	0,86	0,18	1,00	3,154	1,51	20,5	1,38
RB-3-70	2,11	0,92	27,6	0,92	22.100	0,88	0,17	1,21	2,539	1,31	22,3	1,33

¹⁾ Rohdichte der Prüfkörper zur Bestimmung der Betondruckfestigkeit gemäß Spalte 4 /
Density of specimens for the determination of the compressive strength acc. to column 4

²⁾ Relativwert bezogen auf den entsprechenden Ausgangsbeton AB / Relative value referring to the corresponding original AB concrete

$\beta_{D,28}$: Druckfestigkeit, Würfel: Kantenlänge 150 mm / Compressive strength, cubes 150 mm

$E_{b,28}$: Statischer E-Modul, Zylinder D/H = 150/300 mm / Static modulus of elasticity, cylinder 150/300 mm

$\mu_{b,28}$: Querdehnzahl / Poisson's ratio

$\epsilon_{b,u,28}$: Längsdehnung im Bruchzustand (last geregelt) / Ultimate longitudinal strain under compression (load controlled)

$W_{v,d}$: Gesamte offene Porosität / Total open porosity

Die Ergebnisse zum Festigkeits- und Verformungsverhalten sowie die gesamten offenen Porositäten der untersuchten Betone enthält Tafel 6. Bild 11 zeigt beispielhaft die Entwicklung des statischen E-Moduls in Abhängigkeit von der Anzahl der Aufbereitungen. Im Vergleich zu den Ausgangsbetonen wurden nach der dritten Wiederverwendung 12 % bzw. 14 % niedrigere E-Moduln ermittelt. Die Einordnung dieser Werte im Vergleich zu Betonen mit natürlichen Gesteinskörnungen wurde bereits in Abschnitt 4.2.3 behandelt. Insgesamt fallen bei der Betrachtung der Ergebnisse in Tafel 6 die im Vergleich zu den übrigen Werten signifikant niedrigeren Druckfestigkeiten und E-Moduln sowie deutlich erhöhte gesamte offene Porositäten der Betone nach der zweiten Aufbereitung auf. Wie in Bild 10 zu erkennen ist, war nach der zweiten Aufbereitung ein scheinbarer deutlicher Anstieg der Wasseraufnahme ermittelt worden. Eine fehlerhafte Bestimmung konnte vor dem Hintergrund der übrigen Werte nicht ausgeschlossen werden. Da die rezyklierten Gesteinskörnungen mit der auf diesem Wege bestimmten Wassermenge vorgemischt worden waren, dürften die Eigenschaften der Betone nach der zweiten Aufbereitung durch im Vergleich zu den übrigen Betonen erhöhte wirksame Wasserzementwerte beeinflusst worden sein. Ohne diesen Einfluss entstand praktisch keine Verringerung der Betondruckfestigkeit durch die mehrfache Wiederverwendung.

Insgesamt war festzustellen, dass Recyclingbeton mehrfach ohne wesentliche Qualitätsverluste wieder verwendet werden kann. Diese Aussage gilt für die Verwendung von Betonsplitt > 4 mm und unter der Voraussetzung, dass der Beton auf gleichem Festigkeitsniveau wieder verwendet wird. D.h., bei der Wiederverwendung von Betonsplitt aus Beton einer bestimmten Festigkeitsklasse wird dieser wieder in Beton derselben Festigkeitsklasse (w/z-Wert!) eingesetzt. Untersucht wurden die Parameter Druckfestigkeit und statischer E-Modul. Auch für die Carbonatisierung des Betons ist nach den hier ermittelten gesamten offenen Porositäten des Betons kein deutlicher Anstieg zu erwarten. Diese Ergebnisse wurden bei mittleren Zementsteingehalten der rezyklierten Gesteinskörnungen zwischen rd. 30 Vol.-% und 45 Vol.-% erzielt. Eine weitere Optimierung der Zerkleinerungstechnik zur Minimierung des Zementsteingehaltes erscheint daher nicht unbedingt notwendig. Bei der Verwendung eines Praxisgemisches unbekannter Herkunft (Betonbruch 2/16 mm – keine Ergebnisdarstellung) konnten bei erneuter Wiederverwendung ebenfalls keine wesentlichen Veränderungen der genannten Parameter festgestellt werden.

4.4 Mauermörtel mit rezyklierten Gesteinskörnungen

In einem eigenen Versuchsprogramm wurde der Option der Verwendung von Brechsanden in Mauermörteln nachgegangen.

ison with concretes made with natural aggregates has already been dealt with in Section 4.2.3. As a whole the compressive strengths and elastic moduli, which are significantly lower in comparison to the other values, as well as the significantly increased total open porosities of the concretes after the second processing, stand out in the examination of the results in Table 6. Figure 10 shows that an apparently significant rise in water absorption had been determined after the second processing. Against the background of the other values it is not possible to rule out a faulty determination. The recycled aggregates had been pre-wetted with the quantity of water determined in this way so the properties of the concretes after the second processing may well have been influenced by the increased effective water/cement ratio compared to the other concretes. Apart from this effect there was practically no reduction in concrete compressive strength due to repeated re-use.

As a whole, it was established that recycled concrete can be re-used again repeatedly without essential loss of quality. This applies to the use of concrete chippings > 4 mm under the precondition that the concrete is re-used at the same strength level, i.e. that when the concrete chippings made from concrete of a certain strength class are re-used they are used again in concrete of the same strength class (w/c value!). The compressive strength and static modulus of elasticity parameters were examined. The total open porosities of the concrete measured here show that neither should any significant increase be expected in the carbonation of the concrete. These results were achieved with average levels of hardened cement paste in the recycled aggregates of between about 30 vol.% and 45 vol.%. Further optimization of the comminution technology to minimize the content of hardened cement paste therefore does not appear entirely necessary. No essential changes of the given parameters could be detected during repeated re-use of a practical mix of unknown origin (crushed concrete 2/16 mm – no data given).

4.4 Masonry mortar made with recycled aggregates

The option of using crusher sands in masonry mortars was examined in an in-house test programme. Based on the investigations in [20], mixtures of concrete, clay brick and sand-lime brick crusher sands were investigated in addition to plain materials in analogy with the tests in Section 4.2.

Five 0/4 mm crusher sands produced from single materials were available as the starting materials. These were two concrete crusher sands (AB40, AB70), a sand-lime brick crusher sand (KSB) and two types of clay brick crusher sand (ZB1, ZB2). The reference material, which was not recycled, was Rhine sand (RS). The concrete crusher sands came from the processing of the original concretes in the "multiple recycling" test programme (cf. Section 4.3).

Ausgehend von den Untersuchungen in [20] wurden neben sortenreinen Materialien, analog zu den Versuchen in Abschnitt 4.2, auch Gemische aus Beton-, Mauerziegel- und Kalksandsteinbrechsanden untersucht.

Als Ausgangsmaterialien standen fünf sortenrein hergestellte Brechsande 0/4 mm zur Verfügung. Es handelte sich hierbei um zwei Betonbrechsande (AB40, AB70), einen Kalksandsteinbrechsand (KSB) sowie zwei Sorten Ziegelbrechsand (ZB1, ZB2). Das nicht rezyklierte Referenzmaterial war Rheinsand (RS). Die Betonbrechsande stammten aus der Aufbereitung der Ausgangsbetone im Versuchsprogramm „Mehrfachrecycling“ (vgl. Abschnitt 4.3). Bei dem Kalksandsteinbrechsand (KSB) und den zwei Sorten Ziegelbrechsand (ZB1, ZB2) handelte es sich um die Brechsande der Ausgangsmaterialien aus dem Versuchsprogramm in Abschnitt 4.2.

Als Versuchsmörtel wurde in Anlehnung an die Untersuchungen in [20] ein Normalmörtel der Mörtelgruppe NM IIa nach DIN 1053 Teil 1 [21] ausgewählt. Die Zusammensetzung wurde auf Grundlage des Rezeptmörtels nach Tafel 2.1 Zeile 9 der DIN 1053 Teil 1 festgelegt. Als Bindemittel sind dabei Zement und Kalkhydrat einzusetzen, wobei hier ein Portlandzement CEM I 32,5 R und handelsübliches Weißkalkhydrat verwendet wurden. Das Mischungsverhältnis des Rezeptmörtels von Kalkhydrat : Zement : Sand betrug dabei 1 : 1 : 6 in Raumteilen. Es wurden insgesamt 15 Mörtel mit den nach Tafel 7 zusammengesetzten Gesteinskörnungen hergestellt. Zusätze wurden nicht verwendet. Zur Ermittlung der Bindemittel- und Gesteinskörnungsmassenteile erfolgte eine Umrechnung des in Raumteilen angegebenen Mischungsverhältnisses mit Hilfe der Schüttdichten. Tafel 8 zeigt beispielhaft einige der im Alter von 28 Tagen ermittelten Festmörteleigenschaften.

In Übereinstimmung mit Literaturergebnissen zeigen diese Daten, dass unter Verwendung von Betonbrechsand ≤ 4 mm Normalmörtel der Mörtelgruppe IIa hergestellt werden können. Gleiches galt für die beiden eingesetzten Ziegelbrechsande. Die Vermischung von Beton und Mauerwerk aus Mauerziegeln – untersucht wurden Ziegelanteile bis 85 M.-% – stellt nach den hier erzielten Ergebnissen für die Mörteldruckfestigkeit im Hinblick auf die Verwendung der anfallenden Brechsande keine Beeinträchtigung der Verwertbarkeit dar. Mörtel mit Beton- und Ziegelbrechsand erreichten stets die für die genannte Mörtelgruppe in DIN 1053-1

Tafel 7: Zusammenstellung der Gesteinskörnungsgemische zur Herstellung von Mauermörteln

Table 7: Review of the aggregate mixes used for the production of masonry mortars

Bezeichnung Marking	Gesteinskörnung / Aggregate					
	AB40	AB70	KSB	ZB1	ZB2	RS
	M.-%					
1	2	3	4	5	6	7
1.100 (AB40)	100	–	–	–	–	–
2.100 (AB70)	–	100	–	–	–	–
3.100 (KSB)	–	–	100	–	–	–
4.100 (ZB1)	–	–	–	100	–	–
5.100 (ZB2)	–	–	–	–	100	–
6.100 (RS)	–	–	–	–	–	100
2.85-3.15	–	85	15	–	–	–
2.50-3.50	–	50	50	–	–	–
2.15-3.85	–	15	85	–	–	–
2.85-4.15	–	85	–	15	–	–
2.50-4.50	–	50	–	50	–	–
2.85-5.15	–	85	–	–	15	–
2.50-5.50	–	50	–	–	50	–
2.80-3.10-4.10	–	80	10	10	–	–
2.50-3.10-4.40	–	50	10	40	–	–

The sand-lime brick crusher sand (KSB) and the two types of clay brick crusher sand (ZB1, ZB2) were the crusher sands made from the original materials from the test programme in Section 4.2.

A standard mortar of the NM IIa mortar group as defined in DIN 1053 Part 1 [21] was chosen as the test mortar in accordance with the investigations in [20]. The composition was laid down on the basis of the designated mortar in Table 2.1, Line 9, of DIN 1053 Part 1. Cement and hydrated lime were to be used as the binders, and a CEM I 32,5 R Portland cement and a normal commercial white hydrated lime were used here. The hydrated lime : cement : sand mixing ratio of the designated mortar was 1 : 1 : 6 in parts by volume. A total of 15 mortars were produced with the aggregates listed in Table 7. Additives were not used. A conversion calculation of the mixing ratio specified in parts by volume was carried out with the aid of the bulk densities to determine the proportions of binders and aggregate by mass. By way of example Table 8 shows some of the solid mortar properties determined at 28 days.

These data agree with the results in the literature and show that it is possible to produce normal mortar of the IIa mortar group using concrete crusher sands ≤ 4 mm. The same applies to the two clay brick crusher sands used. According to the results achieved here for the mortar compressive strength the mixture of concrete and masonry made of clay bricks – proportions of brick of up to 85 wt.% were investigated – showed no adverse effect on the usability in respect of the use of the crusher sands obtained. In all cases the mortars made with concretes and clay brick crusher sand reached the compressive strength of 5.0 N/mm² required in DIN 1053-1 for quality control for the named mortar group. The value of 7.0 N/mm² stipulated for the compliance test were also reached or even exceeded in the majority of cases. The values for the β_{BZ}/β_D ratio lay in the range of the values determined in [20] and therefore within the range of empirical values for normal NM IIa mortar.

Based on the shrinkage values measured on the mortars made with concrete crusher sand it can be assumed that masonry mortar made with 100 wt.% concrete crusher sand shrinks more than nor-

Tafel 8: Festmörteleigenschaften der untersuchten Mörtel
Table 8: Properties of the hardened mortars investigated

Mörtel Mortar	β_D	β_{BZ}/β_D	ϵ_s	ρ_D	P_{Hg}
	N/mm ²	–	mm/m	kg/dm ³	Vol.-%
1	2	3	4	5	6
1.100 (AB40)	9,66	0,37	1,26	1,635	34,0
2.100 (AB70)	5,89	0,39	1,29	1,635	34,2
3.100 (KSB)	4,07	0,33	1,56	1,635	35,8
4.100 (ZB1)	9,34	0,37	0,73	1,520	37,1
5.100 (ZB2)	7,48	0,30	0,81	1,325	35,8
6.100 (RS)	8,08	0,35	0,55	1,985	23,1
2.85-3.15	6,40	0,31	1,52	1,630	37,1
2.50-3.50	5,93	0,27	1,65	1,525	34,7
2.15-3.85	4,65	0,36	1,70	1,640	36,1
2.85-4.15	6,39	0,39	1,30	1,595	35,8
2.50-4.50	8,06	0,39	1,05	1,555	37,4
2.85-5.15	6,80	0,39	1,29	1,560	38,2
2.50-5.50	7,15	0,40	1,09	1,480	42,4
2.80-3.10-5.10	7,00	0,35	1,31	1,590	36,3
2.50-3.10-4.40	7,25	0,36	1,13	1,580	36,7

β_D : Mörteldruckfestigkeit im Alter von 28 d

Compressive strength of mortars at the age of 28 d

β_{BZ}/β_D : Verhältnis Biegezugfestigkeit zu Mörteldruckfestigkeit im Alter von 28 d

Ratio of flexural tensile strength to mortar compressive strength at 28 d

ϵ_s : Schwinddehnung nach 90tägiger Lagerung im Klima 20 °C/65 % r. F.

Shrinkage after 90 d storage at 20 °C/65 % r. F.

ρ_D : Trockenrohdichte im Alter von 28 d (Quecksilberdruckporosimetrie)

Dry density at the age of 28 d (Hg intrusion porosimetry)

P_{Hg} : Gesamtporosität im Alter von 28 d (Quecksilberdruckporosimetrie)

Total porosity at the age of 28 d (Hg intrusion porosimetry)

für die Güteprüfung geforderte Druckfestigkeit von 5,0 N/mm². In den meisten Fällen wurde auch der für die Eignungsprüfung festgelegte Wert von 7,0 N/mm² erreicht oder sogar überschritten. Die Werte für das Verhältnis β_{BZ}/β_D lagen im Bereich der in [20] ermittelten Werte und damit in der Bandbreite der für Normalmörtel NM IIa bekannten Werte.

Aufgrund der an den Mörteln mit Betonbrechsand ermittelten Schwinddehnungen ist davon auszugehen, dass Mauermörtel mit 100 M.-% Betonbrechsand mehr schwindet als übliche Normalmörtel. In [22] werden für Normalmörtel bei einer Lagerung in 65 % relativer Luftfeuchte Endschwindwerte von 0,5 mm/m bis 1,5 mm/m angegeben. Bei Verwendung von Betonbrechsanden ist nach dem zeitlichen Verlauf des Schwindens mit Endschwindwerten > 1,5 mm/m zu rechnen. Durch den Austausch von Betonbrechsand gegen Kalksandsteinbrechsand nahm das Schwinden weiter zu. Durch den Austausch von Betonbrechsand gegen Ziegelbrechsand konnte eine Verringerung der Schwinddehnungen erreicht werden. Besteht der Brechsand zu 50 M.-% aus Beton bzw. zementgebundenen Anteilen und zu 50 M.-% aus Ziegelbrechsand, so ist mit Endschwindmaßen im Wertebereich von Normalmörteln zu rechnen.

Im Hinblick auf die Verwendung von Brechsanden zur Herstellung von Mauermörteln wurde auf der Grundlage der hier ermittelten Versuchsergebnisse die Feuchtedehnung, d.h. das Schwinden, als „Leitgröße“ angesehen. Dieser Parameter wurde als die Eigenschaft ermittelt, die eine Wiederverwendung als Gesteinskörnung für Mauermörtel am stärksten einschränkt. Die aus den Versuchen abgeleiteten einsetzbaren Mengen (Abschnitt 5) wurden aus dem Alter von 90 Tagen nach Luftlagerung ermittelten Schwindwerten im Verhältnis zum Mörtel mit Rheinsand errechnet. Dabei wurde von einem linearen Verhältnis zwischen Gesteinskörnungsanteil und Schwindmaß ausgegangen.

Um die Eignung der rezyklierten Gesteinskörnungen zur Herstellung von Mauermörteln nach DIN 1053-1 abschließend nachzuweisen, müssten noch weitere Eigenschaften überprüft werden. Für Normalmörtel müssen neben der Druckfestigkeit die Anforderungen an die Haftscherfestigkeit und die Druckfestigkeit in der Fuge eingehalten werden. Auf der Grundlage der in [20] ermittelten Ergebnisse sind aufgrund dieser Parameter jedoch bei den hier untersuchten Gesteinskörnungen keine weiteren Einschränkungen zu erwarten. Zwei der hier untersuchten Mörtel könnten aufgrund ihrer Trockenrohichte (< 1,5 kg/dm³) den Leichtmörteln zugeordnet werden. Sollen sie in diesem Anwendungsbereich eingesetzt werden, wären zusätzlich der Quer- und Längsdehnungsmodul, die Haftscherfestigkeit und die Wärmeleitfähigkeit zu prüfen.

5 Schlussfolgerungen – Beitrag zur Nachhaltigkeit

Der Beitrag der stofflichen Wiederverwendung mineralischer Baustoffe zu den Zielen Ressourcenschonung und Abfallvermeidung lässt sich nur bedingt quantifizieren. Ein Grund ist die unscharfe Datenlage im Hinblick auf den Anfall und die Zusammensetzung der mineralischen Bauabfälle. Die Verwendung neuer Baustoffe sowie Anfall und Zusammensetzung der Bauabfälle sind regional unterschiedlich und von der jeweils aktuellen Marktsituation bzw. der Baukonjunktur abhängig. Bild 12 zeigt, welche Einsatzmöglichkeiten für rezyklierte Gesteinskörnungen > 2 mm maximal z.B. in Betonen für Innenbauteile zu erwarten sind. Auf der Grundlage der dargestellten Untersuchungsergebnisse können – wie das angegebene Beispiel zeigt – in der Korngruppe 2/16 mm (Sieblinie A/B 16) 64 Vol.-% an rezykliertem Gesteinskörnung eingesetzt werden, wenn die Konstruktion zu rd. 70 Vol.-% aus Beton, zu rd. 20 Vol.-% aus Hochlochziegelmauerwerk und zu rd. 10 Vol.-% aus Kalksandsteinmauerwerk besteht. Bei einer reinen Betonkonstruktion erhöht sich der einsetzbare Anteil auf rd. 80 Vol.-%. Diesen Werten liegen die Untersuchungen zum Festigkeits- und Verformungsverhalten zugrunde, in denen der E-Modul des Betons als der Parameter identifiziert wurde, der die Wiederverwertung maßgeblich begrenzt. Wie aus Bild 12 hervorgeht, können in einem Beton für Innenbauteile je nach Zusammensetzung des Ausgangsmaterials rd. 40 Vol.-% bis 80 Vol.-% der natürlichen Gesteinskörnung > 2 mm durch eine rezyklierte Gesteinskörnung ersetzt werden. Diese Werte entsprechen bei einer Sieblinie A/B 16 rd. 25 Vol.-% bis

mal mortar. Ultimate shrinkage values of 0.5 mm/m to 1.5 mm/m are given in [22] for normal mortar during storage in 65 % relative air humidity. Based on the behaviour of the shrinkage with time ultimate shrinkage values > 1.5 mm/m can be expected when using concrete crusher sand. The shrinkage increased further when concrete crusher sand was replaced by sand-lime brick crusher sand but a reduction in the shrinkage values was achieved when concrete crusher sand was replaced by clay brick crusher sand. If the crusher sand consists of 50 wt.% concrete and cement-bonded fractions and 50 wt.% clay brick crusher sand then ultimate shrinkage values which lie within the range of values of normal mortars can be expected.

In respect of the use of crusher sands for producing masonry mortars the change in length due to moisture, i.e. the shrinkage, was regarded as the “command variable” on the basis of the test results determined here. This parameter was determined as the property which causes the greatest restriction on re-use as aggregate for masonry mortar. The quantities which can be used as deduced from the trials (Section 5) were calculated from the shrinkage values determined after 90 days’ air storage in relation to mortar made with Rhine sand. A linear relationship between the proportion of aggregate and the shrinkage was assumed.

Further properties would have to be checked for ultimate verification of the suitability of the recycled aggregates for producing masonry mortars conforming to DIN 1053-1. For normal mortars it is necessary to meet not only the requirements on the compressive strength but also the requirements on adhesive shear strength and compressive strength in joints. However, on the basis of the results determined in [20] these parameters are not expected to cause any further limitations for the aggregates investigated here. Because of their dry densities (< 1.5 kg/dm³) two of the mortars investigated here could be classified as lightweight mortars. If they are to be used in this area of application it would also be necessary to check the moduli for lateral and longitudinal strain, the adhesive shear strength and the thermal conductivity.

5 Conclusions - contribution to sustainability

The contribution made by the re-use of mineral building materials to the objectives of conserving resources and avoiding waste can only be quantified to a limited extent. One reason is the uncertainty of the data with respect to the quantity and composition of the mineral building wastes. The use of new building materials and the quantity and composition of the building wastes differ regionally and depend on the particular market situation and building activities at any given time. Figure 12 shows the maximum potential usage which can be expected for recycled aggregates larger than 2 mm, e.g. in concretes for internal components. On the basis of these investigative results it is possible – as the given example shows – to use 64 vol.% of recycled aggregate in the size range 2/16 mm (grading curve A/B 16), when the structure consists of about 70 vol.% of concrete, about 20 vol.% of vertically perforated clay bricks, and about 10 vol.% of sand-lime bricks. With a structure made entirely of concrete the percentage which can be used increases to about 80 vol.%. These values are based on the investigations into the strength and deformation characteristics, in which the modulus of elasticity of the concrete was identified as the parameter which essentially limits the re-use. As can be seen from Figure 12, about 40 to 80 vol.% of the natural aggregates larger than 2 mm in a concrete for internal components can, depending on the composition of the starting material, be replaced by a recycled aggregate. For an A/B 16 grading curve these values correspond to about 25 to 50 vol.% of the total aggregate. The code of practice “Concrete with recycled aggregate” is therefore expected to permit the use of a maximum of 50 vol.% of recycled aggregate larger than 2 mm in concretes for internal components. It has also been established that concrete can be re-used several times without essential loss of quality.

Of the quantity of natural aggregates (gravel/sand, etc.) required annually in Germany for producing ready-mixed concrete of the B 25 strength class about 40 % by mass (about 16 million t) could theoretically be replaced in concrete for external components, e.g. during the processing of 18 million t building rubble from struc-

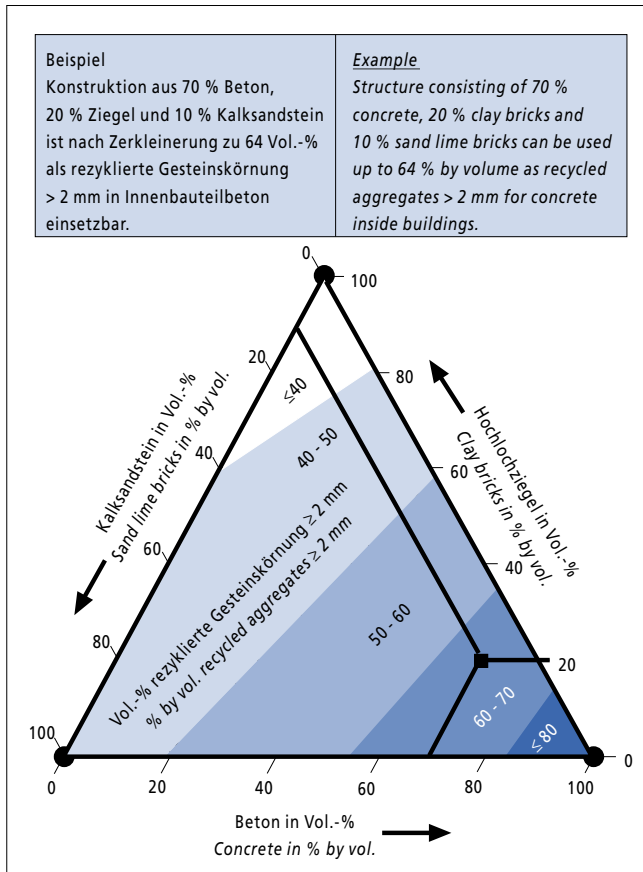


Bild 12: Beton in Kombination mit Kalksandsteinen und Hochlochziegeln; Grenzen der Verwertung als Gesteinskörnung für Beton – Kriterium: E-Modul

Figure 12: Concrete in combination with sand-lime bricks and vertically perforated clay bricks; limits to recycling as concrete aggregate – criterion: modulus of elasticity

50 Vol.-% der gesamten Gesteinskörnung. Die Richtlinie „Beton mit rezykliertem Zuschlag“ wird daher voraussichtlich den Einsatz von maximal 50 Vol.-% rezyklierter Gesteinskörnung > 2 mm in Innenbauteilbetonen zulassen. Es wurde weiterhin festgestellt, dass Beton mehrfach ohne wesentliche Qualitätsverluste wiederverwendet werden kann.

Von der in Deutschland jährlich zur Herstellung von Transportbeton der Festigkeitsklasse B 25 benötigten Menge natürlicher Gesteinskörnungen (Kies/Sand o.a.) könnten theoretisch in Beton für Außenbauteile z.B. bei Aufbereitung von 18 Mio. t Bauschutt aus Konstruktionen, die im Mittel zu rd. 60 Vol.-% aus Beton und zu 40 Vol.-% aus Mauerziegeln bestanden, rd. 40 M.-% (rd. 16 Mio. t) ersetzt werden. Bei dieser Zusammensetzung könnten gleichzeitig rd. 50 M.-% (rd. 1,3 Mio. t) des zur Herstellung von Normalmörtel benötigten Sandes eingespart werden. Bei reinen Betonkonstruktionen könnten rd. 50 M.-% der Gesteinskörnung im Beton bzw. 40 M.-% der Gesteinskörnung im Mörtel substituiert werden. Der Beitrag zur Abfallvermeidung und damit der umwelttechnische Nutzen lässt sich durch die Betrachtung für 1 m³ verbauter Baustoffe am Ende seiner Nutzungsphase beurteilen. Bild 13 zeigt für verschiedene Baustoffkombinationen den sog. Verwertungsgrad. Dieser Wert entspricht dem Volumenverhältnis von verbautem Baustoff am Ende seiner Nutzung zu neuem Baustoff (Beton und Mörtel), der zu seiner vollständigen Verwertung im Hochbau hergestellt werden müsste. Dabei wurde die vollständige Verwendung der rezyklierten Gesteinskörnung 2/16 mm im Beton und des restlichen Materials 0/2 mm im Mauermörtel angenommen. Die Verwendung rezyklierter Gesteinskörnungen für Mörtel und Beton leistet damit einen Beitrag zu einer hochwertigen Kreislaufführung von Bauabfällen entsprechend einem Verwertungsgrad zwischen 20 % und 40 %.

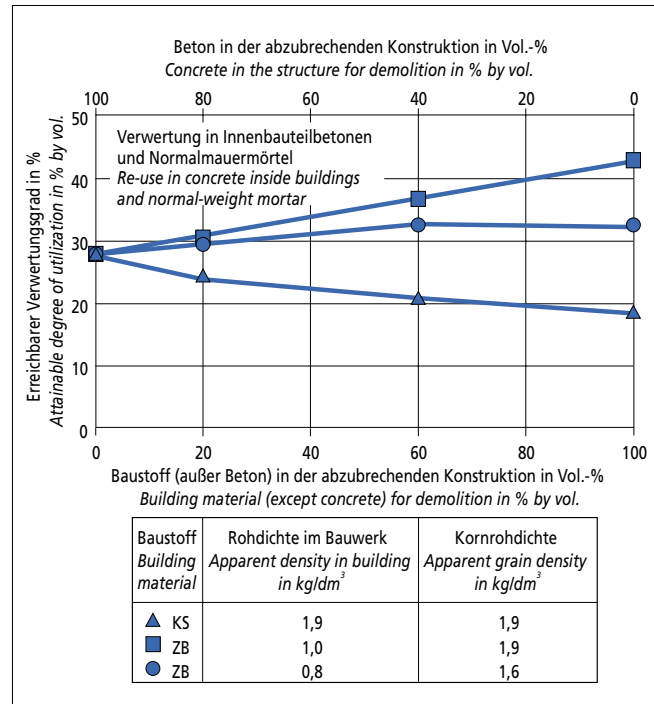


Bild 13: Erreichbarer Verwertungsgrad von 1 m³ verbauter Baustoffe [Beton/Mauerziegel (ZB)/Kalksandstein (KS)] bei Verwertung als Gesteinskörnung für Beton und Mauermörtel

Figure 13: Attainable degree of utilization for 1 m³ of installed building materials [concrete/clay bricks (ZB)/sand-lime bricks (KS)] when recycled as aggregate for concrete and masonry mortar

tures which consist on average of about 60 vol.% of concrete and 40 vol.% of masonry bricks. With this composition it would also be possible to save about 50 % by mass (about 1.3 million t) of the sand required for producing standard mortar. For structures made entirely of concrete about 50 % by mass of the aggregate in the concrete and 40 % by mass of the aggregate in the mortar could be replaced. The contribution to avoidance of waste, and hence to the benefit of the environment, can be assessed by considering 1 m³ of installed building materials at the end of their utilization phase. Figure 13 shows the degree of utilization for different building material combinations. This value corresponds to the volume ratio of installed building material at the end of its utilization to new building materials (concrete and mortar) which would have to be produced for complete utilization of the used building material in building construction. This assumes complete usage of the recycled 2/16 mm aggregate in concrete and of the remaining 0/2 mm material in masonry mortar. The use of recycled aggregates for mortar and concrete therefore makes a contribution to high grade recycling of building wastes corresponding to a degree of utilization of between 20 and 40 %.

Literatur / Literature

- [1] WCED, 1987. Our Common Future (Der Brundlandt-Bericht). Oxford, World Commission on Environment and Development/ Oxford University Press. 393 S. (deutsch: Unsere gemeinsame Zukunft; Der Brundlandt-Bericht der Weltkommission für Umwelt und Entwicklung, Herausgeber: Volker Hauff, Eggenkamp Verlag, Greven 1987, 421 S.)
- [2] Deutscher Bundestag: Abschlussbericht der Enquete-Kommission „Schutz des Menschen und der Umwelt – Ziele und Rahmenbedingungen einer nachhaltig zukunftsverträglichen Entwicklung“. Konzept Nachhaltigkeit vom Leitbild zur Umsetzung. Bonn: Deutscher Bundestag, 1998. – Drucksache 13/11200
- [3] Hasse, R.: Funktionen und Steuerungspotentiale ökologischer Leitbilder aus soziologischer Perspektive – das Beispiel „Sustainable Development“. In: Ökologische Bewertung kurz- und langlebiger Wirtschaftsgüter; Leitbilder – Methoden – Umsetzungen. Wissenschaft und Umwelt 1-2, 1996, S. 19–24, Aachen, 1996
- [4] Müller, C.: Beton als kreislaufgerechter Baustoff. Berlin: Beuth, 2001. – (DAfStb: Schriftenreihe 513). – ISBN 3-410-65713-4
- [5] Müller, C.; Schießl, P.; Kwiasowski, R.: Recyclingzuschlag für Beton: Anwendung von Recyclingmaterialien nach DIN 1045. In: Beton 46 (1996), Nr. 8, S. 473-478
- [6] N. N.: Baustoffkreislauf im Massivbau; Prüfverfahren für technologische Untersuchungen (unveröffentlicht)
- [7] Bunke, N.: Prüfung von Beton Empfehlungen und Hinweise als Ergänzung zu DIN 1048. Berlin: Beuth. – In: Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (1991), Nr. 422
- [8] Auberg, R.: Zuverlässige Prüfung des Frost- und Frost-Tausalz-Widerstands von Beton mit dem CDF- und CIF-Test. Essen: Universität Gesamthochschule. – In: Mitteilungen aus dem Institut für Bauphysik und Materialwissenschaften (1999), Nr. 6 = Dissertation, 1998
- [9] Setzer, M. J.; Auberg, R.: Prüfverfahren des Frostwiderstands von Beton: Bestimmung der inneren Schädigung – CIF-Test (Capillary Suction, Internal Damage and Freeze-Thaw Test). In: Fachtagung des IBPM CF- und CDF-Test Prüfung des Frost- und Frost-Tausalz-Widerstandes, 22. Januar 1998 in Essen, 6 Seiten = In: Betonwerk und Fertigteil-Technik 64 (1998), Nr. 4, S. 94–100, 102–105
- [10] Tang, L.: Chloride Transport in Concrete – Measurement and Prediction. Göteborg, Chalmers University of Technology, Diss., 1996
- [11] Compliance Testing for Probabilistic Design Purposes. Gouda: Centre for Civil Engineering Research and Codes (CUR), 1999; ISBN 90 376 0420 x
- [12] DIN 18 555 Teil 1 12.85. Prüfung von Mörteln mit mineralischen Bindemitteln; Allgemeines, Probennahme, Prüfmörtel. Teil 3 11.82. Prüfung von Mörteln mit mineralischen Bindemitteln; Bestimmung der Biegezugfestigkeit, Druckfestigkeit und Rohdichte
- [13] prEN 1015-11 06.93. Entwurf: Prüfverfahren für Mörtel von Mauerwerk; Bestimmung der Biegezug- und Druckfestigkeit von Festmörtel
- [14] DIN 52450 08.85. Bestimmung des Schwindens und Quellens an kleinen Probekörpern; Prüfung anorganischer nichtmetallischer Baustoffe
- [15] Wesche, K.: Baustoffe für tragende Bauteile. Bd. 2: Beton, Mauerwerk. 3. Aufl. Wiesbaden: Bauverlag, 1993
- [16] Wesche, K.; Schulz, R.-R.; ibac: Recycling von Baurestmassen: Ein Beitrag zur Kostendämpfung im Bauwesen. Aachen: Institut für Bauforschung, 1986. – Forschungsbericht Nr. F 216 (Stuttgart : IRB, 1986 Best.-Nr. F 2051)
- [17] Meng, B.: Charakterisierung der Porenstruktur im Hinblick auf die Interpretation von Feuchtetransportvorgängen. In: Schriftenreihe Aachener Beiträge zur Bauforschung, Institut für Bauforschung der RWTH Aachen, 1993), Nr. 3, Diss.
- [18] Schießl, P.; Wiens, U.: Beton mit Steinkohlenflugasche – leistungsfähiger, dauerhafter und widerstandsfähiger Baustoff. Essen: VGB Technische Vereinigung der Großkraftwerksbetreiber e.V.; BVK Bundesverband Kraftwerksnebenprodukte e.V., 1998. – In: Flugasche im Beton, VGB/BVK-Fachtagung, 1. Dezember 1998, Vortrag 3, 18 Seiten
- [19] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton; DAfStb: DAfStb-Richtlinie Beton mit rezykliertem Zuschlag. Teil 1: Betontechnik, Teil 2: Betonzuschlag aus Betonsplitt und Betonbrechsand (Ausgabe Aug. 1998)
- [20] Hoppe, B.; Mehlmann, M.; Kazemi, S.: Verwertbarkeit und Umweltverträglichkeit kalkhaltiger Recyclingmaterialien. Köln : Forschungsgemeinschaft Kalk und Mörtel e.V., 1994. – Forschungsbericht Nr. 3/94/M 007 i
- [21] DIN 1053 Teil 1 11.96. Mauerwerk; Berechnung und Ausführung
- [22] Schubert, P.: Zur Feuchtedehnung von Mauerwerk. Aachen, Technische Hochschule, Fachbereich 3, Diss., 1982

