

Eigenschaften von Beton mit rezyklierten Gesteinskörnungen

Properties of concrete with recycled aggregates

Übersicht

Die Recyclingfähigkeit eines Baustoffs trägt zunehmend zu seiner Akzeptanz bei. Verbunden hiermit ist die Einsparung an Primärstoffen. Im Rahmen eines weitgespannten Forschungsprogramms „Baustoffkreislauf im Massivbau“, das durch den Deutschen Ausschuss für Stahlbeton ins Leben gerufen wurde, hat sich das Forschungsinstitut der Zementindustrie mit rezykliertem Zuschlag aus Betonbruch befasst und Beton mit diesem Zuschlag untersucht. Im Vordergrund stand die Dauerhaftigkeit von Beton und der Einsatz von Betonbrechsand.

Die Festigkeit und Dauerhaftigkeit von Beton wurde durch rezyklierten Zuschlag nur unwesentlich beeinflusst, jedoch nahm der Elastizitätsmodul des Betons mit zunehmendem Anteil an Brechsand deutlich ab und nahmen das Schwinden und Kriechen zu. Wenn die Bemessung von Betonbauteilen nach den in DIN 1045 getroffenen Regeln auch für Beton mit rezykliertem Betonsplitt und Betonbrechsand durchgeführt werden soll, müssen deren Anteile an der gesamten Gesteinskörnung im Beton begrenzt werden.

Abstract

The recyclability of a building material is contributing increasingly to its acceptability. This is linked with the saving of primary materials. The German Research Institute of the Cement Industry studied recycled aggregates made from crushed used concrete and examined concrete containing this aggregate within the framework of a broad scope research programme entitled “Recycled building materials in solid construction” initiated by the German Committee for Reinforced Concrete (DAfStb). The main focus was on the durability of the concrete and the use of concrete crusher sand.

The strength and durability of concrete were influenced only marginally by recycled aggregate, but the elastic modulus of the concrete decreased significantly with increasing proportion of crusher sand and the shrinkage and creep increased. If the rules given in DIN 1045 are to be applied to the design of concrete components even when the concrete contains recycled concrete chippings and concrete crusher sand then the proportions of these recycled aggregates in the total concrete aggregate will have to be limited.

1 Einleitung

Die industrielle Aufbereitung und Verwertung von Baureststoffen hat sich als ein erfolgreicher Weg erwiesen, um die natürlichen Ressourcen zu schonen. Durch die Verwertung der Baureststoffe werden die Abfallmengen reduziert und damit der erforderliche Deponieraum verringert. So können Rohstoffe und Energie eingespart werden.

Der Deutsche Ausschuss für Stahlbeton hat 1996 zur Erkundung sinnvoller Verwertungswege von Reststoffen im Betonbau ein breit angelegtes Forschungsprogramm „Baustoffkreislauf im Massivbau“ initiiert. In diesem Vorhaben wurden die Abbruchmethoden, die Aufbereitung von Baureststoffen und die Stoffkennwerte der rezyklierten Gesteinskörnungen (bisher: rezyklierter Zuschlag) sowie die Eigenschaften des Betons, der mit diesem Material hergestellt wird, systematisch untersucht. Weiterhin wurde überprüft, in welchen Mengen rezyklierte Gesteinskörnungen aus Betonbruch und Bauschutt eingesetzt werden dürfen, ohne dass dies Änderungen bei der Bemessung von Betonbauteilen nach den geltenden Festlegungen in der Beton- und Stahlbetonnorm DIN 1045 zur Folge hätte. Das Forschungsinstitut der Zementindustrie hat sich mit Untersuchungen zur Verwendung von Gesteinskörnungen aus Betonbruch an den Arbeiten beteiligt und dabei insbesondere die Einsatzmöglichkeiten von Betonbrechsand als rezyklierte Gesteinskörnung und als zementfeiner Bestandteil der Mehlkornmatrix untersucht.

2 Entwicklung des Baustoffrecyclings

2.1 Umnutzung, Wiederverwendung, Rückbau

Das Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz kennt Produkte und Abfälle. Produkte sind Stoffe, die für einen konkreten Verwendungszweck hergestellt werden, Abfälle sind danach bewegliche Sachen, die ihr Besitzer loswerden will oder muss, wenn sie anfallen, ohne dass dies der Zweck der Handlung war. Abfälle sind auch die Stoffe, deren ursprüngliche Zweckbestimmung entfällt. Die

1 Introduction

The industrial preparation and utilization of building residues has proved to be a successful way of conserving natural resources. Utilization of building residues reduces the quantities of waste. This decreases the landfill space required and can save raw materials and energy.

In 1996 the German Committee for Reinforced Concrete initiated a broad scope research programme entitled “Recycled building materials in solid construction” to investigate appropriate ways of utilizing residual materials in concrete construction. This project systematically examined the method of demolition, the preparation of building residues and the material parameters of the recycled aggregates as well as the properties of the concrete produced with this material. A check was also carried out on the quantities of recycled aggregate from crushed concrete and building rubble which can be used without causing changes in the design of concrete components in accordance with the relevant requirements in the German concrete and reinforced concrete standard DIN 1045. The Research Institute of the Cement Industry took part in this work with investigations into the utilization of aggregates from crushed concrete, and in particular it examined the possible uses of concrete crusher sand as recycled aggregate and as a cement-fine constituent of the ultrafines matrix.

2 Development of recycled building materials

2.1 Change of use, re-use, demolition

The Recycling and Wastes Act recognizes products and wastes. Products are substances which are produced for a specific intended application, whereas wastes are movable assets which their possessor wants to, or has to, dispose of when they occur without this being the aim of the business. Wastes are also those substances for which the originally intended purpose no longer exists. Wastes can be divided into wastes for utilization and wastes for disposal. In principle, the following ranking applies in the recycling economy.

Abfälle werden unterteilt in Abfälle zur Verwertung und Abfälle zur Beseitigung. Grundsätzlich gelten in der Kreislaufwirtschaft folgende Rangstufen. Oberstes Ziel ist die Vermeidung von Abfall, an zweiter Stelle steht die Verwertung und an dritter Stelle die Entsorgung der Stoffe, die nicht verwertbar sind. Im Bauwesen bestehen hierfür folgende Möglichkeiten. Als erstes ist zu untersuchen, ob die Nutzungsdauer von Bauwerken verlängert werden kann. Häufig ist dies jedoch auch nach einer Modernisierung aus funktionellen Gründen nicht möglich. Die Bedürfnisse gewerblicher oder privater Nutzer von Bauwerken unterliegen häufig starken Veränderungen. Die Praxis zeigt, dass auch Bauwerke, die in den letzten fünfzig Jahren errichtet wurden, aus vielerlei Gründen nicht mehr nutzbar sind. Der Lebenszyklus z.B. für Produktionsstätten beträgt in der Regel inzwischen nur noch 15 bis 20 Jahre.

Neben der Wiederverwendung ganzer Bauwerke besteht unter Umständen noch die Möglichkeit, einzelne Bauteile wieder zu verwerten, wenn bei der Konstruktion und Ausführung eine spätere Wiederverwertung vorgesehen war. Auf dem Markt werden z.B. unterschiedliche Systeme von Betonfertigteilen angeboten, die in einfacher Weise montiert und demontiert werden können. Hat ein Bauwerk keine weitere Verwendung, werden die Fertigteile ausgebaut und können für neue Bauwerke eingesetzt werden. Es muss jedoch beachtet werden, dass logistische Probleme diese Verwertungsmöglichkeiten erschweren und die Wirtschaftlichkeit im Vergleich zu neuen Bauteilen nicht grundsätzlich gegeben ist.

Auch in Zukunft wird eine Wiederverwendung von Bauwerken oder von Bauteilen eher die Ausnahme bilden. Der größere Teil der nicht mehr nutzbaren Bauwerke wird weiterhin abgerissen bzw. rückgebaut werden. Das Verwertungsgebot führt dann zu der Frage, wie ein hoher Verwertungsgrad der wiedergewonnenen Baustoffe ermöglicht werden kann.

2.2 Baureststoffe

Von rd. 400 Mio. t Abfall im Jahr 1997 in Deutschland betragen die Baureststoffe rd. 285 Mio. t, wobei der Erdaushub mit ca. 208 Mio. t den größten Teil einnimmt. Bild 1 zeigt die Einteilung der Baureststoffe (77 Mio. t) ohne Erdaushub, d.h. Straßenaufbruch, Bauschutt und Baustellenabfälle. Ca. 30 % der 77 Mio. t werden deponiert, ca. 70 % recycelt und wiederverwertet. Die Auswirkung der Recyclingbaustoffe auf die Gesamtmenge der eingesetzten Baustoffe von rd. 770 Mio. t bleibt von untergeordneter Bedeutung, selbst wenn der Anteil an Recyclingbaustoffe in den nächsten Jahren noch ansteigt (Bild 2) [3].

Die Entwicklung der Abbruchmengen und damit der Baureststoffe vorherzusagen, ist recht schwierig. Sie hängt nicht zuletzt von der Entwicklung der Wirtschaft ab. In den 50er Jahren stieg die Betonproduktion drastisch an und erreichte Anfang der 70er Jahre ihren Höhepunkt. Legt man für die Standzeit von Bauwerken im Mittel 50 bis 70 Jahre zugrunde, so ergibt sich in den ersten 20 Jahren dieses Jahrhunderts ein drastischer Anstieg der Abbruchmenge [10].

3 Recycling von Betonbruch

3.1 Stand der Kenntnisse

Rezyklierte Gesteinskörnungen aus Betonbruch können, abhängig von der Betonzusammensetzung insbesondere von dem Wasserzementwert des Ausgangsbetons und von der Art der Aufbereitung, unterschiedliche Eigenschaften aufweisen. Beim Brechvorgang reichert sich der Zementmörtel besonders in den Korngruppen ≤ 4 mm an und erhöht damit die Porosität und die Wasseraufnahme dieser Korngruppen. Grübl [7] gibt die Wasseraufnahme von Betonbrechsand (0/4 mm) mit ca. 10 M.-% und für Betonsplitt (4/16 mm) mit ca. 5 M.-% bis 8 M.-% an. Die Verarbeitbarkeit von Beton mit rezyklierten Gesteinskörnungen ist durch das stärkere Wasseraugen der Gesteinskörnung im Vergleich zu Beton mit natürlichen Gesteinskörnungen schlechter. Dies kann durch das Vornässen der rezyklierten Gesteinskörnung teilweise ausgeglichen werden.

Der Einfluss von rezyklierten Gesteinskörnungen auf die Festigkeit des Betons wird unterschiedlich beurteilt. Dillmann [5] findet einen Einfluss der Festigkeit des Ausgangsbetons auf die Festigkeit des neuen Betons. In anderen Arbeiten [5, 6, 7, 8] liegen die Festigkeiten des Ausgangsbetons teilweise oberhalb und teilweise

The prime objective is the avoidance of waste. In second place is utilization and in third place is the disposal of the materials which cannot be utilized. The following options are available in construction work. The first is to investigate whether the useful life of a structure can be extended. However, even after modernization this is often impossible for functional reasons. The needs of commercial or private users of structures are frequently subject to severe changes. Practical experience shows that even structures which were built in the last 50 years are no longer usable for a variety of reasons. The life cycle of production sites, for example, is as a rule only between 15 to 20 years.

Alongside the re-use of complete structures there is also the option under some circumstances of re-using individual components if provision had been made for subsequent re-use in the design and construction. Various systems of precast concrete elements, for example, are available on the market which are simple to install and dismantle. If a structure has no further use the precast elements are removed and can be used for new structures. However, it must be borne in mind that these options are made more difficult by logistic problems and that they are not necessarily cost-effective when compared with new components.

Even in the future the re-use of structures or components will tend to be the exception. The majority of structures which are no longer usable will continue to be torn down and demolished. The requirement for utilization then leads to the question as to the extent to which use can be made of the recovered building materials.

2.2 Building residues

Of the approximately 400 million tonnes of waste in Germany in 1997 the building residues amounted to about 285 million tonnes, the majority being accounted for by the approximately 208 million tonnes of excavated earth. Figure 1 shows the classification of the building residues (77 million t) without the excavated earth, i.e. broken roadbuilding material, building rubble and building site waste. Approximately 30 % of the 77 million t are landfilled, and approximately 70 % are recycled and re-used. The effect of the recycled building materials on the total quantity of building materials used of about 770 million t will remain of secondary importance even if the percentage of recycled building materials increases further in the coming years (Figure 2) [3].

It is really difficult to predict the growth in the quantity of demolition materials and hence of building residues. It depends not least on the growth of the economy. Concrete production rose dramatically in the 50s and reached its high point at the start of the 70s. Based on an average service life of structures of 50 to 70 years there will be a drastic increase in the quantity of demolition material in the first 20 years of this century [10].

3 Recycling crushed used concrete

3.1 Current understanding

Recycled aggregates made from crushed used concrete can exhibit differing properties depending on the concrete composition, especially the water/cement ratio of the original concrete, and on the nature of the preparation. During the crushing process the cement mortar tends to build up in the size range ≤ 4 mm and therefore increases the porosity and water absorption of this size range. Grübl [7] gives the water absorption of concrete crusher sand (0/4 mm) as approximately 10 wt.% and of concrete chippings (4/16 mm) as approximately 5 wt.% to 8 wt.%. The workability of concrete made with recycled aggregates is worse than that of concrete made with natural aggregates because of the greater water absorption of the aggregate. This can be partially offset by pre-wetting the recycled aggregate.

There are differing assessments of the influence of recycled aggregates on the strength of the concrete. Dillmann [5] finds that the strength of the original concrete affects the strength of the new concrete. In other works [5, 6, 7, 8] the strengths of the original concrete are sometimes above and sometimes below the strength of the concrete made with recycled aggregates. According to Lukas [9] the use of concrete crusher sand in concrete reduces the strength.

The elastic modulus of concretes made with recycled aggregates is 15 % to 50 % lower than in normal concrete [8]. The reasons

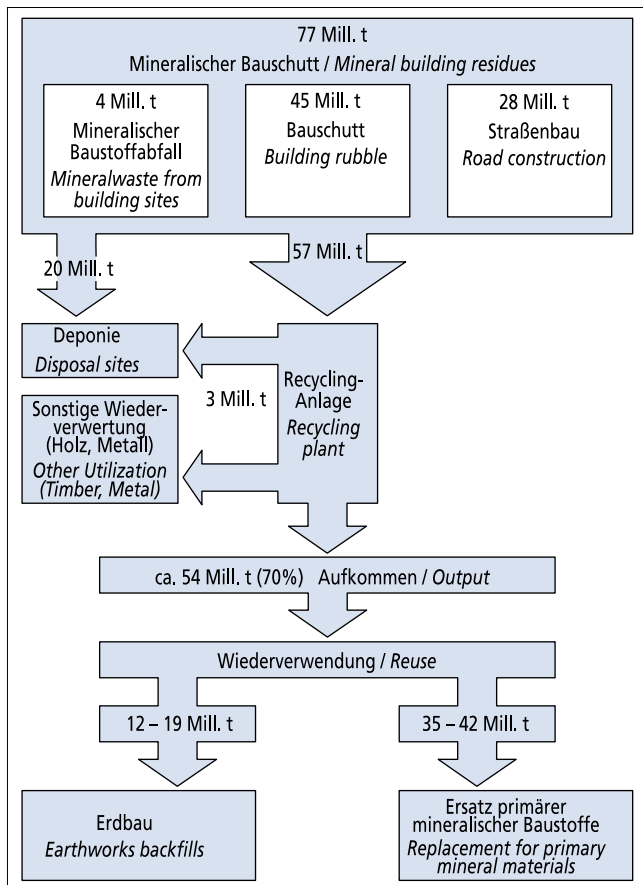


Bild 1: Verwertete Mengen an Baureststoffen – Mittelwert aus 1996 und 1997 nach [11]
Figure 1: Quantities of building residues used – average values for 1996 and 1997 [11]

unterhalb der Festigkeit des Betons mit rezyklierten Gesteinskörnungen. Der Einsatz von Betonbrechsand im Beton wirkt sich nach Lukas [9] festigkeitsmindernd aus.

Der Elastizitätsmodul von Betonen mit rezyklierten Gesteinskörnungen ist um 15 % bis 50 % niedriger als bei Normalbeton [8]. Als Ursachen werden der höhere Zementsteinanteil und der niedrigeren E-Modul der Gesteinskörnung angegeben. Nachteilig wirkt sich offensichtlich der Einsatz von Betonbrechsand aus.

Einige Autoren [7, 8] geben eine deutlich höhere Carbonatisierungsgeschwindigkeit bei Betonen mit rezyklierten Gesteinskörnungen im Vergleich zu Betonen mit natürlichen Gesteinskörnungen an. Zurückgeführt wird dies auf die höhere Porosität der Gesteinskörnungen.

Bei den von Gröbl [7] zusammengestellten Untersuchungen haben alle Betone mit rezyklierten Gesteinskörnungen einen ausreichenden Widerstand gegen Frost. Eickschen und Siebel [6] stellten in ihren Untersuchungen einen ausreichenden Frost-Tausalz-Widerstand bei Betonen mit bis zu 100 % rezyklierter Gesteinskörnung fest, wenn die Betone ausreichende Luftporenkennwerte aufwiesen.

Die Verformungen werden beim Einsatz von rezyklierten Gesteinskörnungen deutlich größer [7, 13]. Das Schwinden des neuen Zementsteins wird durch den im Vergleich zu natürlicher Gesteinskörnung geringeren E-Modul der rezyklierten Gesteinskörnung weniger behindert und auch der an den rezyklierten Gesteinskörnungen anhaftende Zementstein kann bei Wasserabgabe schwinden [7].

3.2 Ziel und Umfang der Untersuchungen

In den Untersuchungen sollte geklärt werden, wie sich die Verwendung von rezyklierten Gesteinskörnungen auf die Frischbetoneigenschaften, die Festigkeit, die Verformungseigenschaften und die Dauerhaftigkeit des Betons auswirkt.

Die Eigenschaften von Beton mit bis zu 100 % rezyklierter Gesteinskörnung aus Betonbruch wurden untersucht und dabei

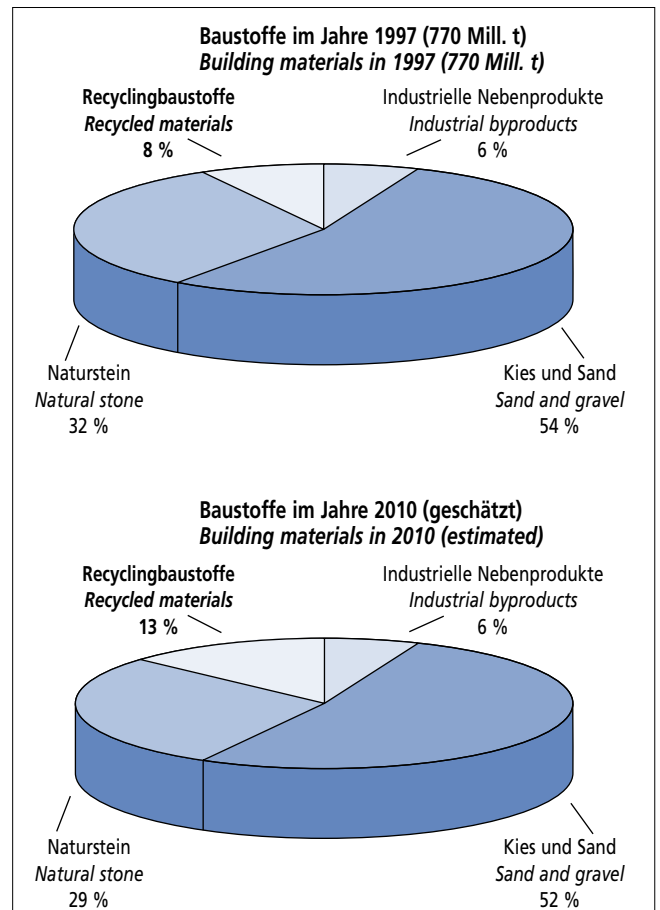


Bild 2: Produktion von Gesteinsbaustoffen [1]
Figure 2: Produktion of building materials [1]

given are the higher proportion of hardened cement paste and the lower elastic modulus of the aggregate. The use of concrete crusher sand apparently has a detrimental effect.

Some authors [7, 8] give a significantly higher rate of carbonation in concretes made with recycled aggregates compared to concretes with natural aggregates. This is attributed to the higher porosity of the aggregates.

In the investigations listed by Gröbl [7] all concretes made with recycled aggregates have adequate resistance to freeze-thaw. In their investigations Eickschen and Siebel [6] established that concretes containing up to 100 % recycled aggregate had adequate resistance to freeze-thaw with de-icing salt provided the concretes had adequate air void parameters.

The deformation is significantly greater when recycled aggregates are used [7, 13]. The shrinkage of the new hardened cement paste is less restricted by the lower elastic modulus of the recycled aggregate compared to the natural aggregate, and the hardened cement paste adhering to the recycled aggregates can also shrink on loss of water [7].

3.2 Aim and scope of the investigations

The investigations were intended to clarify how the use of recycled aggregates affects the fresh concrete properties and the strength, deformation characteristics and durability of the concrete.

The properties of concrete containing up to 100 % recycled aggregate made from crushed used concrete were investigated, with particular emphasis on testing the influence of concrete crusher sand and concrete ultrafines. Only pure crushed concrete was used in the investigations. "Old concrete" was produced for this purpose and then recycled aggregates were produced from it after a few months.

Approximately 40 % concrete crusher sand is produced during the preparation of crushed concrete. According to the current state

insbesondere der Einfluss von Betonbrechsand und -mehlkorn geprüft. In die Untersuchungen wurde nur reiner Betonbruch einbezogen. Hierfür wurde „Altbeton“ und daraus nach einigen Monaten rezyklierte Gesteinskörnungen hergestellt.

Da beim Aufbereitungsprozess von Betonbruch ca. 40 % Betonbrechsand anfällt und nach heutigem Stand der Technik der Betonbrechsand nicht zu 100 % als Gesteinskörnung für neuen Beton eingesetzt werden kann, wurde zusätzlich der Frage nachgegangen, wie sich zementfeiner Betonbrechsand als Bestandteil der Mehlkornmatrix auf die Frisch- und Festbetoneigenschaften auswirkt.

4 Versuchsdurchführung

4.1 Herstellung und Untersuchung der rezyklierten Gesteinskörnungen

Es wurden zwei Betone unterschiedlicher Zusammensetzung mit natürlicher Gesteinskörnung (Rheinkiesand) in einem Transportbetonwerk hergestellt, rd. 15 m³ Beton mit einem Flugaschegehalt von 50 kg/m³ und einem äquivalenten Wasserzementwert von 0,68 (Festigkeitsklasse ≙ B 15; Bezeichnung Ra) und ca. 4 m³ mit einem Flugaschegehalt von 20 kg/m³ und einem äquivalenten Wasserzementwert von 0,48 (Festigkeitsklasse ≙ B 45; Bezeichnung Rb). Die mit diesen Betonen hergestellten Platten (15 cm x 100 cm x 100 cm) wurden im Freien gelagert und nach 3 Monaten vorgebrochen. In einer Baustoff-Recyclinganlage wurde das Material mit Hilfe eines Prallbrechers weiter zerkleinert und in die drei Korngruppen 0/4 mm, 4/8 mm und 8/16 mm durch Sieben aufgeteilt.

An den durch Brechen des Betons gewonnenen rezyklierten Gesteinskörnungen und an den natürlichen Gesteinskörnungen wurden die Kornverteilung und die abschlämmbaren Bestandteile nach DIN 4226-3 bestimmt. Die Wasseraufnahme nach 10 Minuten und 60 Minuten und die Rohdichte wurde gemäß der Arbeitsanleitung „Bestimmung der Wasseraufnahme und der Kornrohichte von rezykliertem Zuschlag“ [4] bestimmt. An den rezyklierten Gesteinskörnungen Ra und Rb wurde der Widerstand gegen Frost nach DIN 4226-3 ermittelt. Dabei wurde die Prüfung des Frostwiderstands sowohl bei Beanspruchung des Betons bei mäßiger Durchfeuchtung als auch bei starker Durchfeuchtung durchgeführt.

An dem Betonbrechsand und den beiden Betonsplittkorngruppen wurde der Anteil der natürlichen Gesteinskörnung und des Zementsteins nach DIN 52170-2 ermittelt.

4.2 Prüfung von Beton mit rezyklierten Gesteinskörnungen

4.2.1 Ausgangsstoffe

Für die Versuche wurde Portlandzement CEM I 32,5 R verwendet. In einem Zusatzversuch wurde ein Portlandkalksteinzement CEM II/A-L 32,5 R eingesetzt. Als Gesteinskörnungen wurden die rezyklierten Körnungen Ra und Rb in den Korngruppen 0/4 mm, 4/8 mm und 8/16 mm, und als natürliche Körnungen Quarzmehl: 0/0, 125 mm, Rheinsand 0/4 mm, Rheinkiesand 2/8 mm und Rheinkies 8/16 mm eingesetzt. Es wurde ein Fließmittel auf der Basis von Melaminsulfonat und als Zugabewasser Leitungswasser aus dem Trinkwassernetz der Stadt Düsseldorf verwendet.

4.2.2 Betonzusammensetzungen

Die gesamte Gesteinskörnung wurde aus Rheinkiesand, Betonbrechsand und Betonsplitt zusammengesetzt (Tafel 1). Der Anteil des Brechsands (rezyklierte Gesteinskörnung ≤ 4 mm) am Gesamtandgehalt betrug 0 Vol.-%, 50 Vol.-% bzw. 100 Vol.-%, der des Betonsplitts 0 Vol.-% bzw. 100 Vol.-%. Für alle Betone wurde eine Sieblinie des Zuschlags im mittleren Bereich des Sieblinienbereiches AB 16 gewählt. Der Zementgehalt betrug 320 kg/m³. Um einen konstanten wirksamen w/z-Wert sicherzustellen, wurde wie beim Leichtbeton das Wassersaugen der rezyklierten Gesteinskörnungen berücksichtigt. Das erforderliche Zusatzwasser entsprach der Wasseraufnahme der Gesteinskörnung nach 10 Minuten, die gesondert ermittelt wurde. Als wirksamer w/z-Wert wurde 0,55 gewählt. Um bei allen Betonen einheitlich die Konsistenz von KR zu erzielen, wurde ein Fließmittel verwendet.

Folgende Zusatzversuche wurden durchgeführt:

1. Einsatz eines Portlandkalksteinzements CEM II/A-L anstelle eines Portlandzements CEM I

of the art it is not possible to use 100 % of the concrete crusher sand as aggregate for new concrete so the effect on the properties of fresh and hardened concrete when cement-fine concrete crusher sand is used as a constituent of the ultrafines matrix was also investigated.

4 Test procedure

4.1 Production and examination of the recycled aggregates

Two concretes with different compositions were produced in a ready-mixed concrete plant using natural aggregate (coarse Rhine sand); about 15 m³ concrete with a fly ash content of 50 kg/m³ and an equivalent water/cement ratio of 0.68 (strength class ≙ B 15; designated Ra) and about 4 m³ with a fly ash content of 20 kg/m³ and an equivalent water/cement ratio of 0.48 (strength class ≙ B 45; designated Rb). The slabs (15 cm x 100 cm x 100 cm) produced with these concretes were stored in the open and pre-crushed after 3 months. The material was comminuted further in a building materials recycling plant using an impact crusher and separated into the three size ranges 0/4 mm, 4/8 mm and 8/16 mm by screening.

The particle size distributions and the settleable solids as defined in DIN 4226-3 were determined on the recycled aggregates obtained by crushing the concrete and on the natural aggregates. The water absorption after 10 minutes and 60 minutes and the bulk density were determined in accordance with the working instructions for “Determination of the water absorption and granular bulk density of recycled aggregate” [4]. The resistance to freeze-thaw of the recycled aggregates Ra and Rb was determined in accordance with DIN 4226-3. The freeze-thaw resistance was tested on the concrete with moderate moistening and also with thorough moistening.

The proportions of natural aggregates and of hardened cement paste in the concrete crusher sand and in the two concrete chippings size groups were determined in accordance with DIN 52170-2.

4.2 Testing concrete made with recycled aggregates

4.2.1 Starting materials

CEM I 32,5 R Portland cement was used for the trials. A CEM II/A-L 32,5 R Portland limestone cement was used in a supplementary trial. The aggregates used were the recycled particulate materials Ra and Rb in the size ranges 0/4 mm, 4/8 mm and 8/16 mm and the natural particulate materials quartz meal 0/0.125 mm, Rhine sand 0/4 mm, coarse Rhine sand 2/8 mm and Rhine gravel 8/16 mm. A superplasticizer based on melamine sulfonate was used, and the mixing water was tap water from the drinking water network of the town of Düsseldorf.

4.2.2 Concrete compositions

The complete aggregate was composed of coarse Rhine sand, concrete crusher sand and concrete chippings (Table 1). The proportion of crusher sand (recycled aggregate ≤ 4 mm) in the total sand content was 0 vol.%, 50 vol.% or 100 vol.%, and of the concrete chippings was 0 vol.% or 100 vol.%. A grading curve for the aggregate in the central part of the AB 16 grading curve range was chosen for all concretes. The cement content was 320 kg/m³. The water absorption of the recycled aggregates was taken into account, in the same way as with lightweight concrete, in order to ensure a constant effective w/c ratio. The extra water needed corresponded to the water absorption of the aggregate after 10 minutes, which was determined separately. 0.55 was chosen as the effective w/c ratio. A superplasticizer was used to achieve a uniform KR consistency for all concretes.

The following additional tests were carried out:

1. Use of a CEM II/A-L Portland limestone cement instead of a CEM I Portland cement
2. Addition of the extra water during the mixing process
3. Use of 0.125/4 mm concrete crusher sand; the ultrafines < 0.125 mm were screened off beforehand

The mix compositions are listed in Table 1.

4.2.3 Production and storage

The aggregates were pre-wetted in a laboratory mixer with the extra water (water content of the aggregates after 10 minutes' wa-

2. Zugabe des Zusatzwassers beim Mischvorgang
3. Verwendung von Betonbrechsand 0,125/4 mm, das Mehlkorn < 0,125 mm wurde vorher abgesiebt

Eine Zusammenstellung der Mischungszusammensetzungen ist in Tabelle 1 enthalten.

4.2.3 Herstellung und Lagerung

Die Gesteinkörnungen wurden in einem Labormischer mit dem Zusatzwasser (Wassergehalt der Gesteinkörnungen nach 10 Minuten Wasseraufnahme) und 20 % des Anmachwassers vorgegast. Hierfür wurden die Gesteinkörnungen mit dem für das Vornässen verwendete Wasser rd. 30 Sekunden gemischt und blieben danach 10 Minuten abgedeckt im Mischer stehen. Anschließend wurde der Zement, der Rest des Anmachwassers und ggf. Zusatzmittel zugegeben und der Beton 1,5 Minuten gemischt. Bei einer Zusatzmischung wurde das gesamte Wasser zu Beginn des Mischvorgangs zugegeben.

Für die Festbetonprüfungen wurden von jeder Mischung folgende Prüfkörper in Stahlformen hergestellt:

- Druckfestigkeit: 6 Würfel mit 15 cm Kantenlänge
- Spaltzugfestigkeit: 3 Würfel mit 15 cm Kantenlänge
- Schwinden/Quellen und dyn. E-Modul: 4 Balken 10 cm x 10 cm x 50 cm
- Carbonatisierung: 2 Balken 10 cm x 10 cm x 50 cm
- Statischer Elastizitätsmodul und Spannungs-Dehnungs-Linie: 2 Zylinder Ø 15 cm / h = 30 cm
- Permeabilität: 2 Scheiben Ø 15 cm / h = 5 cm
- Frost-Widerstand: 2 Würfel mit 100 mm Kantenlänge
- Kriechen: 2 Zylinder Ø 15 cm / h = 60 cm
- Schwinden: 2 Zylinder Ø 15 cm / h = 60 cm

Die für die Druck- und Spaltzugfestigkeitsprüfung sowie die für die Bestimmung des statischen Elastizitätsmoduls vorgesehenen Prüfkörper wurden entsprechend DIN 1048 gelagert. Die Würfel zur Prüfung des Frostwiderstands, die Scheiben für die Bestimmung der Permeabilität und die Balken zur Bestimmung des Carbonatisierungsfortschritts wurden nach dem Entschalen im Alter von 1 Tag bis zum Alter von 7 Tagen unter Wasser und danach bis zur Prüfung im Klimaraum 20/65 gelagert. Die für die Verformungsmessungen vorgesehenen Balken wurden nach dem Ausschalen im Alter von einem Tag mit Messmarken versehen und anschließend bis zum Alter von 7 Tagen unter Wasser gelagert. Danach verblieben die Probekörper für das Quellen unter Wasser. Die Probekörper zur Bestimmung des Schwindens und Kriechens wurden danach im Klimaraum bei 20/65 gelagert. Die Kriechkörper wurden im Alter von 28 Tagen in die Kriechstände eingebaut.

4.2.4 Prüfung von Frisch- und Festbeton

Alle Prüfungen wurden, wenn nicht besonders erwähnt, nach DIN 1048 durchgeführt.

Frischbeton

Die Konsistenz wurde mit dem Ausbreitmaß, der Luftgehalt und die Rohdichte im Luftporentopf ermittelt. Der LP-Gehalt wurde 10 Minuten und das Ausbreitmaß 10 und 60 Minuten nach dem Mischen bestimmt.

Festbeton

Die Druckfestigkeit wurde an jeweils drei Würfeln mit 150 mm Kantenlänge im Alter von 7 und 28 Tagen, die Spaltzugfestigkeit ebenfalls an drei Würfeln im Alter von 28 Tagen geprüft.

Für die Prüfung des Quellens und Schwindens wurde der Abstand der Messmarken auf zwei gegenüberliegenden Seiten der Balken mit einem Setzdehnungsmesser gemessen. Die Nullmessung wurde im Alter von einem Tag, die weiteren Längenmessungen im Alter von 3, 4, 7, 14, 28, 56, 85, 119, 182, 208, 301 und 365 Tagen und danach 1/4-jährlich bis zum Alter von 2 1/2 Jahren durchgeführt und hieraus die Dehnung der Balken berechnet [2].

Neben den Schwindmessungen wurde an den Balken die Eigenschwingzeit nach einer Impulsanregung gemessen und daraus der dynamische E-Modul berechnet.

Die Carbonatisierungstiefe wurde an jeweils zwei Balken mit den Abmessungen 10 cm x 10 cm x 50 cm geprüft. Im Alter von 28, 91, 182, 364 und 730 Tagen wurde von beiden Balken eine

Tafel 1: Zusammensetzung der Betone
Table 1: Mix composition of the concretes

Beton Concrete	Zement Cement		Gesteinskörnung Aggregate	Betonbruch RCA ²⁾		Fließmittel in % vom Zement Superplasticizer in % of cement	
	Festigkeitsklasse Strength class	Gehalt Content kg/m ³		≤ 4 mm	> 4 mm		
				Vol.-%			
B1	CEM I 32,5 R	320	Rheinkiepsand Coarse Rhine sand	0	0	-	
B2	CEM I 32,5 R	320	Ra	0	100	-	
B3	CEM I 32,5 R	320		(aus B 15)	50	100	1,1
B4	CEM I 32,5 R	320			100	100	1,9
B5	CEM I 32,5 R	320	Rb	0	100	-	
B6	CEM I 32,5 R	320		(aus B 45)	50	100	1,9
B7	CEM I 32,5 R	320			100	100	2,0
B8	CEM I 32,5 R	320	Ra	100	100	2,0	
B9	CEM I 32,5 R	320	Rb	100 ¹⁾	100	2,5	
B10 ³⁾	CEM I 32,5 R	320	Ra	100	100	2,5	
B11	CEM III/A-L 32,5 R	320	Ra	100	100	2,5	

¹⁾ 0,125/4 mm ²⁾ RCA: Recycled Concrete Aggregate ³⁾ Berücksichtigung der 24-stündigen Wasseraufnahme/24 hours water absorption taken into account

ter absorption) and 20 % of the mixing water. The aggregates were mixed for about 30 seconds with the water used for the pre-wetting and then remained covered in the mixer for 10 minutes. The cement, the rest of the mixing water and, where necessary, the superplasticizer were then added and the concrete was mixed for 1.5 min. In a supplementary mix the entire water was added at the start of the mixing process.

The following test pieces were produced in steel moulds from each mix for testing the hardened concrete:

- Compressive strength: six cubes with 15 cm edge length
- Tensile splitting strength: three cubes with 15 cm edge length
- Shrinkage/swelling and dynamic elastic modulus: four 10 cm x 10 cm x 50 cm beams
- Carbonation: two 10 cm x 10 cm x 50 cm beams
- Static elastic modulus and stress-strain curve: two 15 cm diameter x 30 cm cylinders
- Permeability: two 15 cm diameter x 5 cm discs
- Freeze-thaw resistance: two cubes with 100 mm edge length
- Creep: two 15 cm diameter x 60 cm cylinders
- Shrinkage: two 15 cm diameter x 60 cm cylinders

The test pieces intended for the compressive and tensile splitting strength tests and for determination of the static elastic modulus were stored as specified in DIN 1048. After removal from the mould at the age of 1 day the cubes for testing the freeze-thaw resistance, the discs for determining the permeability and the beams for determining the progress of carbonation were stored under water up to the age of 7 days and then in a 20/65 climatic chamber until tested. After removal from the mould at 1 day the beams intended for the deformation measurements were provided with measuring marks and then stored under water up to the age of 7 days. The test pieces for measuring the swelling then remained under water, but the test pieces for determining the shrinkage and creep were then stored in the 20/65 climatic chamber. The creep test pieces were installed in the creep stands at the age of 28 days.

4.2.4 Testing the fresh and hardened concrete

All tests which are not mentioned separately were carried out in accordance with DIN 1048.

ca. 50 mm dicke Scheibe abgespalten und die frische Bruchfläche mit einer 1%igen Phenolphthalein-Lösung besprüht [2].

Der statische E-Modul und die Spannungsdehnungslinie (σ/ϵ -Linie) wurden an zwei Zylindern \varnothing 15 cm / h = 30 cm geprüft. Hierfür wurden auf zwei gegenüberliegenden Mantellinien rechtwinklig zur Herstellungsoberseite zwei 15 cm lange Dehnungsmessstreifen mittig aufgeklebt. Der E-Modul wurde nach DIN 1048 ermittelt. Die Spannungsdehnungslinie wurde im Alter von 28 Tagen mit einer konstanten Verformungsgeschwindigkeit von 1 %/min geprüft.

Die Gasdurchlässigkeit wurde an zwei Scheiben \varnothing 15 cm / h = 5 cm im Alter von 56 Tagen festgestellt.

Der Frost-Widerstand wurde mit dem Würfelverfahren in Anlehnung an [2] bestimmt. Es wurden zwei Frost-Tau-Wechsel pro Tag durchgeführt. Der Masseverlust wurde nach 7, 14, 28, 56 und 100 Frost-Tau-Wechseln ermittelt. Zum selben Zeitpunkt wurde die Schalllaufzeit bestimmt, aus der der dyn. E-Modul [2] berechnet wurde.

4.3 Prüfung von Beton mit Betonbrechsand als zementfeinem Bestandteil der Mehlkornmatrix

Zur Überprüfung der Eignung von zementfeinem Betonbrechsand als Bestandteil der Mehlkornmatrix wurde der Betonbrechsand Ra (0/4 mm) auf zwei verschiedene Feinheiten gemahlen; Feinstoff Ra-n auf eine spezifische Oberfläche von 3000 cm²/g und Feinstoff Ra-h auf 5800 cm²/g. Als Portlandzement wurde ein CEM I 42,5 R verwendet.

Die Mischungen aus Portlandzement und zementfein aufgemahlenem Betonbrechsand bestanden dabei aus 85 M.-% bzw. 75 M.-% CEM I 42,5 R und aus 15 M.-% bzw. 25 M.-% Betonbrechsand (Tafel 2).

4.3.1 Physikalische und chemische Eigenschaften der Mischungen aus Portlandzement und zementfeinem Brechsand

Die spezifische Oberfläche der Mischungen aus Portlandzement und zementfeinem Brechsand lagen je nach Menge und Feinheit des gemahlten Brechsands zwischen 3800 cm²/g und 4560 cm²/g. Der nach DIN 1164 geprüfte Wasseranspruch lag zwischen 27 % und 28 %. Die Dichte lag unterhalb der Dichte der Portlandzemente. Mischung R4 mit dem höchsten Anteil an Betonbrechsand hatte die geringste Dichte.

Die Normdruckfestigkeit lag bei den Mischungen mit 15 % rezykliertem feingemahlenem Brechsand geringfügig unter der eines vergleichbaren Zements CEM I 32,5 R. Ein signifikanter Einfluss der Mahlfeinheit des gemahlten Brechsands auf die physikalischen Eigenschaften der Mischungen konnte nicht festgestellt werden.

4.3.2 Betonzusammensetzung

Als Gesteinskörnungen wurden Rheinkiessand der Korngruppen 0/2 mm, 2/8 mm und 8/16 mm und Quarzmehl der Korngruppe 0/0,2 mm verwendet. Es wurde eine Sieblinie im mittleren Bereich des Sieblinienbereichs AB 16 gewählt. Als Zugabewasser wurde Düsseldorf Leitungswasser verwendet. Tafel 2 zeigt den Zementgehalt, den w/z-Wert und die Zusammensetzungen der Mischungen mit Portlandzement und zementfeinem Betonbrechsand. Der Wassergehalt betrug bei allen Mischungen 176 l/m³. Die trockenen Betonausgangsstoffe wurden gewichtsmäßig zugegeben. Nach Zugabe des Wassers wurden die Betone in einem Labormischer zwei Minuten gemischt. Je Beton wurden sechs Würfel mit einer Kantenlänge von 15 cm für die Prüfung der Druckfestigkeit nach 7 und 28 Tagen, zwei 10-cm-Würfel für die Frostprüfung und zwei Balken 10 cm x 10 cm x 50 cm für die Prüfung des Schwindens hergestellt. Die Lagerung erfolgte gemäß Abschnitt 3.5.3.

5 Darstellung und Diskussion der Ergebnisse

5.1 Rezyklierte Gesteinskörnungen

Die rezyklierten Gesteinskörnungen Ra aus niedrig festem Altbeton (B15) und Rb aus höher festem Altbeton (B45) wiesen nach dem Brechen in der Recyclinganlage in etwa die gleiche Kornverteilung auf. Der Zementstein des Altbetons reichert sich, wie die Untersuchung nach DIN 52 170 ergab, beim Brechen im Beton-

Fresh concrete

The consistency was determined by the flow diameter, the air content and the bulk density in the air void test vessel. The air void content was determined 10 minutes after mixing and the flow diameter 10 and 60 minutes after mixing.

Hardened concrete

In each case the compressive strength was measured on three cubes with 150 mm edge length at the ages of 7 and 28 days, and the tensile splitting strength was measured at 28 days, also on three cubes.

The distance between the test marks on two opposing sides of the beams was measured with a stress-probing extensometer to test the swelling and shrinkage. The initial measurement was carried out at the age of 1 day, and the other length measurements at the ages of 3, 4, 7, 14, 28, 56, 85, 119, 182, 208, 301 and 365 days and then every three months up to 2½ years; these were used to calculate the deformation of the beam [2].

In addition to the shrinkage measurements the natural oscillation time of the beams after a pulsed excitation was measured in order to calculate the dynamic elastic modulus.

In each case the depth of carbonation was measured on two 10 cm x 10 cm x 50 cm beams. At the ages of 28, 91, 182, 364 and 730 days an approximately 50 mm thick slice was split from each of the two beams and the fresh fracture face was sprayed with a 1 % phenolphthalein solution [2].

The static elastic modulus and the stress-strain curve (σ/ϵ curve) were tested on two 15 cm diameter x 30 cm cylinders. For this purpose 15 cm long wire strain gauges were glued centrally to two opposing surface lines at right angles to the surface which had been on top during manufacture. The elastic modulus was determined in accordance with DIN 1048. The stress-strain curve was measured at 28 days with a constant rate of deformation of 1 %/min.

The gas permeability was measured on two 15 cm diameter x 5 cm discs at the age of 56 days.

The freeze-thaw resistance was determined by the cube method following the procedure in [2]. Two freeze-thaw cycles were carried out per day. The mass loss was determined after 7, 14, 28, 56 and 100 freeze-thaw cycles. The acoustic transit time, from which the dynamic elastic modulus [2] was calculated, was determined at the same times.

4.3 Testing concrete made with concrete crusher sand as a cement-fine constituent of the ultrafines matrix

To check of the suitability of cement-fine concrete crusher sand as a constituent of the ultrafines matrix the Ra concrete crusher sand (0/4 mm) was ground to two different finenesses; the Ra-n fines were ground to a specific surface area of 3000 cm²/g and the Ra-h fines to 5800 cm²/g. A CEM I 42,5 R was used as the Portland cement.

The mixtures of Portland cement and ground, cement-fine concrete crusher sand consisted of 85 wt.% or 75 wt.% CEM I 42,5 R and 15 wt.% or 25 wt.% concrete crusher sand (Table 2).

4.3.1 Physical and chemical properties of the mixtures of Portland cement and cement-fine crusher sand

Depending on the quantity and fineness of the ground crusher sand the specific surface areas of the mixtures of Portland cement and cement-fine crusher sand lay between 3800 cm²/g and 4560 cm²/g. The water demand tested in accordance with DIN 1164 lay between 27 % and 28 %. The density was less than the density of the Portland cement. Mixture R4 with the highest proportion of concrete crusher sand had the lowest density.

For the mixtures with 15 % recycled, finely ground crusher sand the standard compressive strength lay slightly below that of a comparable CEM I 32,5 R cement. It was not possible to establish any significant influence of the fineness of the ground crusher sand on the physical properties of the mix.

4.3.2 Concrete composition

Coarse Rhine sand of the size ranges 0/2 mm, 2/8 mm and 8/16 mm and quartz meal of the 0/0.2 mm size range were used as the

Tafel 2: Zusammensetzung der Betone mit Mischungen aus Portlandzement und zementfeinem Betonbrechsand

Table 2: Composition of concrete with a mixture of Portland cement and fine recycled aggregate

Beton Concrete	Zement Cement		zementfeiner Betonbrechsand Cement-fine concrete crusher sand	
	Festigkeitsklasse Strength class	Gehalt Content kg/m ³	spezifische Oberfl. Specific surface area cm ² /g	Gehalt Content kg/m ³
R1	CEM I 32,5 R	320	-	-
R2	CEM I 42,5 R	272	3000	48
R3	CEM I 42,5 R	272	5800	48
R4	CEM I 42,5 R	240	5800	80
R5	CEM I 42,5 R	320	-	-

brechsand an. So lag der Zementsteingehalt für die Gesteinskörnung Rb insgesamt bei 26 %, für den Brechsand Rb 0/4 mm bei rd. 31 % und für den Betonsplitt Rb 4/8 mm und 8/16 mm jeweils bei rd. 23 %. Durch die Anreicherung des Zementsteins im Betonbrechsand wies dieser eine höhere Porosität und eine geringere Rohdichte als der Betonsplitt auf. Bedingt hierdurch war die Wasseraufnahme des Brechsands 0/4 mm größer als die der Korngruppen 2/8 mm und 4/16 mm (siehe Bild 3). Aus dem Bild 3 geht ebenfalls hervor, dass bei dem Brechsand insbesondere das Mehlkorn < 0,125 mm, das zu einem großen Teil aus porösen Partikeln des Zementsteins besteht, sehr stark die Wasseraufnahme beeinflusst. Wurde dieses Mehlkorn abgesiebt, so ging die Wasseraufnahme des Brechsands von rd. 9,5 % auf rd. 7 % bzw. von rd. 9 % auf rd. 6,5 % zurück. Die Wasseraufnahme der rezyklierten Gesteinskörnungen liegt deutlich über der des Rheinkieses, aber unterhalb der eines vergleichbaren Leichtzuschlags. Die Wasseraufnahme nach 24 Stunden war nur geringfügig größer (siehe Bild 3) als die nach 10 Minuten, so dass für die Berechnung des Vornässens einer Gesteinskörnung für die Betonherstellung die zehnmünütige Wasseraufnahme ausreicht.

Der Frostwiderstand der rezyklierten Gesteinskörnung wurde sowohl im stark durchfeuchteten Zustand (Einfrieren unter Wasser) als auch bei mäßiger Durchfeuchtung (Einfrieren an Luft) geprüft. Bei beiden Prüfungen konnten die Anforderungen der DIN 4226 an eine Gesteinskörnung mit hohem Frostwiderstand im Allgemeinen nicht erfüllt werden. Beim Frostangriff wird die Zone zwischen anhaftendem Mörtel und natürlicher Gesteinskörnung stark beansprucht, so dass eine Abwitterung auftreten kann. Die Abwitterung war bei dem Betonsplitt Rb größer als bei dem Betonsplitt Ra, da beim Betonsplitt Rb eine größere Menge Zementstein bzw. Mörtel an den größeren Zuschlägen haften blieb, die bei der Frostbeanspruchung gelöst werden konnte.

5.2 Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung

5.2.1 Frischbeton

Dem Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung musste dann ein Fließmittel zur Erzielung der gewünschten Konsistenz KR zugegeben werden, wenn neben dem Betonsplitt auch Betonbrechsand verwendet wurde. Mit steigendem Brechsandgehalt musste die Fließmittelmenge deutlich erhöht werden (siehe Tafel 1). Die raue Oberfläche des Betonbrechsands und das Nachsaugen von Wasser bei der Herstellung und Verarbeitung führte zu einem Rückgang der Konsistenz und machte damit diesen erhöhten Einsatz von Fließmittel notwendig.

Die unterschiedlichen Gesteinskornarten Ra und Rb hatten keinen wesentlichen Einfluss auf die Frischbetoneigenschaften.

5.2.2 Festbeton

Festigkeit

Sowohl die Druck- als auch die Spaltzugfestigkeit der Betone mit 100 % Betonsplitt und unterschiedlichen Gehalten an Betonbrechsand lagen in der gleichen Größenordnung wie die des Referenzbetons mit Rheinkiesesand. Eine signifikante Beeinflussung der Festigkeit durch unterschiedliche Anteile an Betonbrechsand

aggregates. A grading curve was chosen in the central part of the AB 16 grading curve range. Düsseldorf mains water was used as the mixing water. Table 2 shows the cement content, the w/c ratio and the composition of the mixtures with Portland cement and cement-fine concrete crusher sand. In all mixtures the water content was 176 l/m³. The dry concrete starting materials were added on a weight basis. After addition of the water the concretes were mixed for two minutes in a laboratory mixer. Six cubes with an edge length of 15 cm for testing the compressive strength after 7 and 28 days, two 10 cm cubes for the freeze-thaw testing and two 10 cm x 10 cm x 50 cm beams for testing the shrinkage were produced for each concrete. The storage was carried out as described in Section 3.5.3.

5 Presentation and discussion of the results

5.1 Recycled aggregates

The Ra recycled aggregates from low strength old concrete (B15) and Rb from higher strength old concrete (B45) exhibited approximately the same particle size distributions after crushing in the recycling plant. The investigation carried out in accordance with DIN 52 170 showed that the hardened cement paste from the old concrete built up in the concrete crusher sand during crushing. The content of hardened cement paste for the Rb aggregate came to 26 % in total: for the Rb 0/4 mm crusher sand it was about 31 % and for the Rb 4/8 and 8/16 concrete chippings it was about 23 % in both cases. Due to the enrichment of hardened cement paste in the concrete crusher sand this had a higher porosity and a lower bulk density than the concrete chippings. This meant that the water absorption of the 0/4 mm crusher sand was greater than that of the 2/8 mm and 4/16 mm size ranges (see Figure 3). Figure 3 also shows that in the crusher sand the ultrafines < 0.125 mm, which to a great extent consist of porous particles of hardened cement paste, have a particularly strong influence on the water absorption. When these ultrafines were screened off the water absorption of the crusher sand dropped from about 9.5 % to about 7 % and from about 9 % to about 6.5 %. The water absorption of the recycled aggregates is significantly higher than that of the coarse Rhine sand but below that of a comparable lightweight aggregate. The water absorption after 24 hours was only slightly greater (see Figure 3) than after 10 minutes, so the 10-minute water absorption was adequate for calculating the pre-wetting of the aggregate for concrete production.

The freeze-thaw resistance of the recycled aggregate was tested both in a thoroughly moistened state (freezing underwater) and with moderate moistening (freezing in air). The requirements of DIN 4226 for an aggregate with high freeze-thaw resistance were not completely fulfilled in either of the two tests. The zone between adhering mortar and natural aggregate is severely stressed during freeze-thaw attack so that weathering loss may occur. The weathering loss was greater with the Rb concrete chippings than with the Ra concrete chippings because with the Rb concrete chippings a greater quantity of hardened cement paste or mortar, which could be detached during freeze-thaw stressing, remained adhering to the coarser pieces of aggregate.

5.2 Concrete made with recycled aggregate

5.2.1 Fresh concrete

A superplasticizer had to be added to the concrete with recycled aggregate to achieve the required KR consistency when not only concrete chippings but also concrete crusher sand were used. The amount of superplasticizer had to be increased significantly with rising content of crusher sand (see Table 1). The rough surface of the concrete crusher sand and the absorption of water during production and placement led to a fall in consistency which made this increased use of superplasticizer necessary.

The different types of aggregate, Ra and Rb, had no essential influence on the characteristics of the fresh concrete.

5.2.2 Hardened concrete Strength

The compressive strengths as well as the tensile splitting strengths of the concretes made with 100 % concrete chippings and varying contents of concrete crusher sand were of the same order as

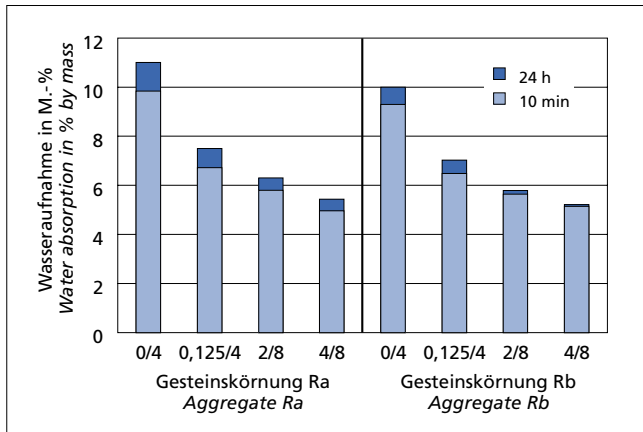


Bild 3: Wasseraufnahme der rezyklierten Gesteinskörnungen Ra und Rb
Figure 3: Water absorption of the recycled aggregates Ra and Rb

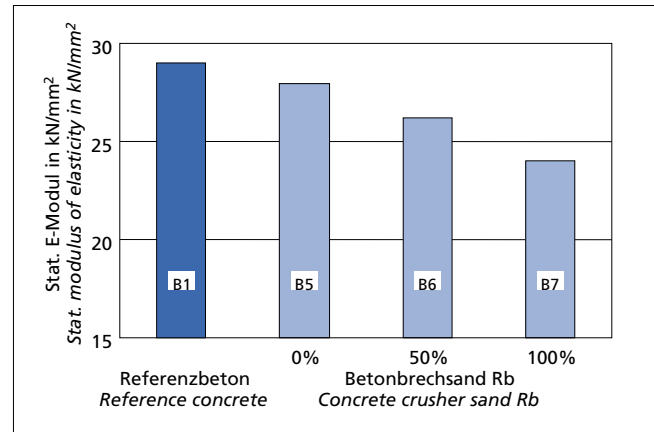


Bild 4: Statischer Elastizitätsmodul des Referenzbetons (B1) und der Betone mit rezyklierter Gesteinskörnung Rb (100 % Betonsplitt und 0 %, 50 % und 100 % Brechsand)
Figure 4: Static modulus of elasticity of the reference concrete (B1) and the concrete with recycled aggregates Rb (100 % concrete chippings and 0 %, 50 % and 100 % concrete crusher sand)

oder durch unterschiedliche Festigkeiten der für die Herstellung der rezyklierten Gesteinskörnungen verwendeten Ausgangsbetone konnte nicht festgestellt werden.

Elastizitätsmodul

Der statische Elastizitätsmodul des Referenzbetons mit Rheinkesssand betrug nach 28 Tagen 28 000 N/mm²; der des Betons mit 100 % Betonsplitt Ra und Rheinsand 26 000 N/mm². Er lag damit nur geringfügig unter dem des Referenzbetons und somit immer noch innerhalb der Bandbreite, die sich bei Betonen mit unterschiedlichen Rheinkessanden ergibt. Der Beton, der 100 % Betonsplitt und 100 % Betonbrechsand Ra enthielt, hatte nach 28 Tagen einen statischen E-Modul von nur 18 000 N/mm². Ursache für den niedrigen E-Modul bei den Betonen mit einem hohen Anteil an rezyklierter Gesteinskörnung war der höhere Anteil an Zementstein. Wurde die rezyklierte Gesteinskörnung Rb eingesetzt, zeigten sich dieselben Tendenzen wie bei der rezyklierten Gesteinskörnung Ra. Der Abfall des E-Moduls war jedoch wegen des dichteren Zementsteins der Gesteinskörnung Rb etwas geringer (siehe Bild 4).

Duktilität

Die Arbeitslinie des Betons mit Betonsplitt und Rheinsand, d.h. ohne Brechsand, entsprach weitgehend der des Referenzbetons aus Rheinkesssand. Die Arbeitslinie des Betons mit 100 % rezyklierter Gesteinskörnung verlief flacher und hatte mit 2,8 ‰ eine größere Dehnung bei Höchstlast als der Referenzbeton mit 2,2 ‰. Der abfallende Ast des Betons mit 100 % rezyklierter Gesteinskörnung verlief flacher. Mit steigendem Anteil an rezyklierter Gesteinskörnung wird die Duktilität und damit die Sicherheit gegen plötzliches Versagen durch örtliche Überbeanspruchung gegenüber dem Referenzbeton mit Rheinkesssand geringfügig erhöht.

Karbonatisierung

Der Karbonatisierungsfortschritt eines Betons wird durch die Porosität des Zementsteins, aber auch durch die der Gesteinskörnung beeinflusst. Auf der einen Seite sind Betonsplitt und Brechsand gegenüber eindringenden Gasen etwas weniger dicht als natürliche Gesteinskörnungen; auf der anderen Seite wird durch die Wasserabgabe der rezyklierten Gesteinskörnung beim Erhärten des Betons der Zementstein durch eine „innere Nachbehandlung“ etwas dichter. Grundsätzlich ergab sich deshalb kein wesentlicher Unterschied zwischen der Karbonatisierungstiefe von Beton mit natürlicher Gesteinskörnung und der von Beton mit Betonsplitt. Auch der Brechsand hatte keinen Einfluss (siehe Bild 5). Ebenso wie bei der Karbonatisierungstiefe war auch bei der Permeabilität kein Einfluss von Art und Menge des eingesetzten Betonsplitts und Brechsandes zu erkennen. Der spezifische Permeabilitätskoeffi-

those of the reference concrete made with coarse Rhine sand. It was not possible to detect any significant influence on the strength due to different proportions of concrete crusher sand or to different strengths of the original concretes used for producing the recycled aggregates.

Elastic modulus

The static elastic modulus of the reference concrete made with coarse Rhine sand was 28 000 N/mm² after 28 days; that of the concrete made with 100 % Ra concrete chippings and Rhine sand was 26 000 N/mm². It was therefore only slightly below that of the reference concrete and so was still within the range obtained with concretes made with different coarse Rhine sands. The concrete which contained 100 % Ra concrete chippings and 100 % Ra concrete crusher sand had a static elastic modulus of only 18 000 N/mm² after 28 days. The reason for the low elastic modulus in the concretes with high proportions of recycled aggregate was the higher proportion of hardened cement paste. When the Rb recycled aggregate was used the same trends were found as with the Ra recycled aggregate. However, the drop in the elastic modulus was somewhat lower because of the denser hardened cement paste of the Rb aggregate (see Figure 4).

Ductility

The stress-deformation curve of the concrete made with concrete chippings and Rhine sand, i.e. without crusher sand, corresponded substantially to that of the reference concrete made with coarse Rhine sand. The stress-deformation curve of the concrete made with 100 % recycled aggregate was flatter and exhibited greater deformation (2.8 ‰) at maximum load than the reference concrete (2.2 ‰). The falling branch of the curve for concrete with 100 % recycled aggregate was flatter. With increasing proportion of recycled aggregate there is a slight increase in ductility, and hence in security against sudden failure through local overstressing, compared with reference concrete made with coarse Rhine sand.

Carbonation

The progress of carbonation in a concrete is influenced not only by the porosity of the hardened cement paste but also by that of the aggregate. On the one hand concrete chippings and crusher sand are somewhat less impermeable than natural aggregates to penetrating gases; on the other hand the cement paste becomes somewhat denser due to “internal curing” as a result of the loss of water from the recycled aggregate during the hardening of the concrete. Basically, therefore, there was no essential difference between the depths of carbonation of concrete made with natural aggregate and that of concrete made with concrete chippings. The crusher sand also had no influence (see Figure 5). As with the depth of carbona-

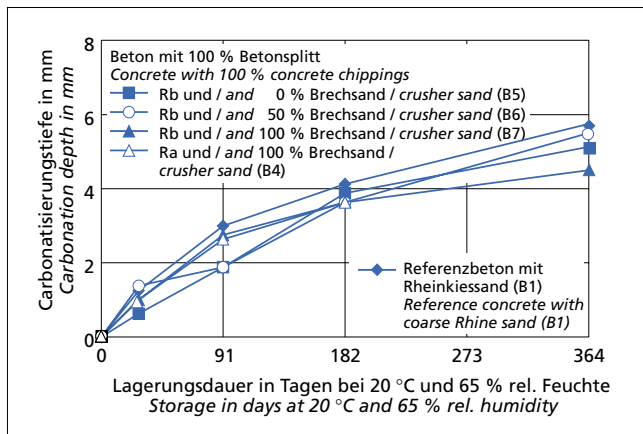


Bild 5: Karbonatisierung des Referenzbetons (B1) und der Betone mit den rezyklierten Gesteinskörnungen Ra und Rb (B4, B5, B6, B7)
Figure 5: Carbonation of the reference concrete (B1) and of the concrete with recycled aggregates Ra and Rb (B4, B5, B6, B7)

zient lag bei allen geprüften Betonen zwischen $1,8 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2$ und $4,8 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2$.

Frostwiderstand

Bei der Frostprüfung (Würfelverfahren) lag der Massenverlust des Betons mit rezyklierter Gesteinskörnung teilweise oberhalb und teilweise unterhalb des Referenzbetons mit Rheinkies sand (siehe Bild 6), aber so dicht zusammen, dass ein Unterschied im Frostwiderstand auch bei Einsatz von 100 % rezyklierter Gesteinskörnung nicht abgeleitet werden konnte. Der Frostwiderstand der Betone mit rezyklierter Gesteinskörnung war ausreichend, obwohl fast alle untersuchten Korngruppen der rezyklierten Gesteinskörnungen die Anforderungen nach DIN 4226-3 an Gesteinskörnungen mit hohem Frostwiderstand nicht erfüllten. In weiteren Untersuchungen ist zu klären, ob die Frostprüfung nach DIN 4226-3 für rezyklierte Gesteinskörnungen modifiziert werden muss. Bei der Frostprüfung wurde auch der dynamische E-Modul bestimmt, um ggf. eine innere Gefügestörung festzustellen. Bei allen geprüften Betonen mit rezyklierter Gesteinskörnung ergab sich kein Abfall des dynamischen E-Moduls.

Schwinden/Quellen

Das Quellen der Betone mit rezyklierter Gesteinskörnung lag nach einem Jahr im Bereich des Referenzbetons mit Rheinkies sand (siehe Bild 7). Ursache für das geringe Quellen ist vermutlich das Vornässen der Gesteinskörnung, das zu einem Quellen dieser Gesteinskörnung vor der Herstellung des Betons führt und so das Gesamtquellen des Betons nicht mehr beeinflusst. Das Schwinden der Betone mit rezyklierter Gesteinskörnung war schon nach einer Lagerung von nur wenigen Tagen im Klimaraum 20/65 größer als das des Referenzbetons mit Rheinkies sand. Wurde Rheinkies sand durch Betonbrechsand ersetzt, nahm das Schwinden auf nahezu den doppelten Wert des Referenzbetons zu (siehe Bild 8). Das Schwinden hängt u.a. von dem E-Modul der Gesteinskörnung ab, der bei rezyklierten Gesteinskörnungen geringer als bei Rheinkies sand ist. Zusätzlich wird das Schwinden des Betons dadurch vergrößert, dass die rezyklierte Gesteinskörnung selbst schwindet. Der Einfluss des Einsatzes von 100 % rezyklierter Gesteinskörnung Rb im Vergleich zum Beton mit 100 % rezyklierter Gesteinskörnung Ra ist ebenfalls im Bild 8 dargestellt. Die durch die höhere Zementsteinfestigkeit höhere Festigkeit und der höhere E-Modul der Gesteinskörnung Rb hatten nach 2,5 Jahren ein um ca. 20 % geringeres Schwinden zur Folge.

Kriechen

Der Betonsplitt und insbesondere der Betonbrechsand haben einen erheblichen Einfluss auf das Kriechen des Betons. Gegenüber dem Referenzbeton aus Rheinkies sand war bei Beton mit

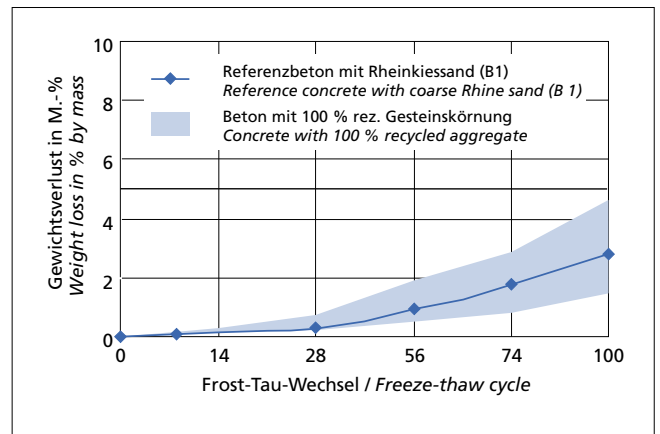


Bild 6: Frostwiderstand des Referenzbetons (B1) und der Betone mit 100 % rezyklierter Gesteinskörnung
Figure 6: Freeze-thaw-resistance of the reference concrete (B1) and of the concretes with 100 % recycled aggregates

tion, the type and quantity of concrete chippings and crusher sand used had no detectable influence on the permeability. The specific permeability coefficients lay between $1,8 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2$ and $4,8 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2$ for all the concretes tested.

Freeze-thaw resistance

In the freeze-thaw test (cube method) the mass loss of the concrete made with recycled aggregate was sometimes above and sometimes below that of the reference concrete made with coarse Rhine sand (see Figure 6) but the results were so close together that no difference in freeze-thaw resistance could be deduced even when using 100 % recycled aggregate. The freeze-thaw resistance of the concretes made with recycled aggregate was adequate even though almost all the size ranges of the recycled aggregates investigated failed to fulfil the requirements in DIN 4226-3 for aggregates with high freeze-thaw resistance. Further investigations will have to clarify whether the freeze-thaw test specified in DIN 4226-3 will have to be modified for recycled aggregates. The dynamic elastic modulus was also determined during the freeze-thaw test in order to detect any possible internal damage to the microstructure. There was no drop in dynamic elastic modulus in any of the concretes tested with recycled aggregate.

Shrinkage/swelling

After one year the swelling of concretes made with recycled aggregate was in the same range as for the reference concrete made with coarse Rhine sand (see Figure 7). The reason for the small amount of swelling is presumably the pre-wetting of the aggregate which causes this aggregate to swell before the concrete is produced so that it no longer influences the overall swelling of the concrete. The shrinkage of concretes made with recycled aggregate was greater than that of the reference concrete made with coarse Rhine sand after a storage of only a few days in the 20/65 climatic chamber. When Rhine sand was replaced by concrete crusher sand the shrinkage increased to almost twice the value of the reference concrete (see Figure 8). The shrinkage depends on, among other things, the elastic modulus of the aggregate, which is lower with recycled aggregates than with coarse Rhine sand. The shrinkage of the concrete is also increased by the fact that the recycled aggregate itself shrinks. Figure 8 also shows the influence of the use of 100 % Rb recycled aggregate compared with concrete made with 100 % Ra recycled aggregate. The higher strength and higher elastic modulus of the Rb aggregate due to the greater strength of the hardened cement paste resulted in a shrinkage which was about 20 % lower after 2.5 years.

Creep

The concrete chippings, and in particular the concrete crusher sand, have a considerable influence on the creep of the concrete. An in-

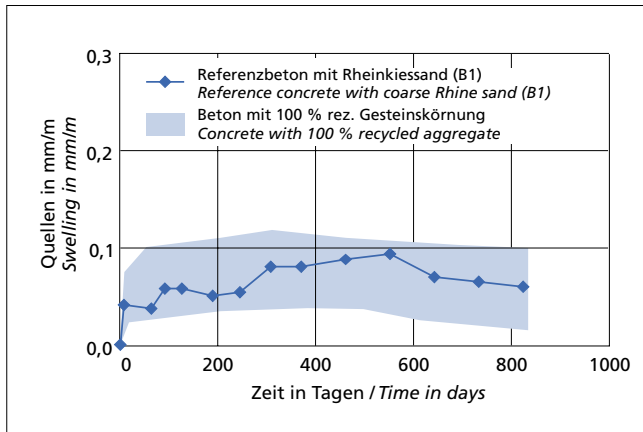


Bild 7: Quellen des Referenzbetons (B1) und der Betone mit 100 % rezyklierter Gesteinskörnung
Figure 7: Swelling of the reference concrete (B1) and of the concretes with 100 % recycled aggregates

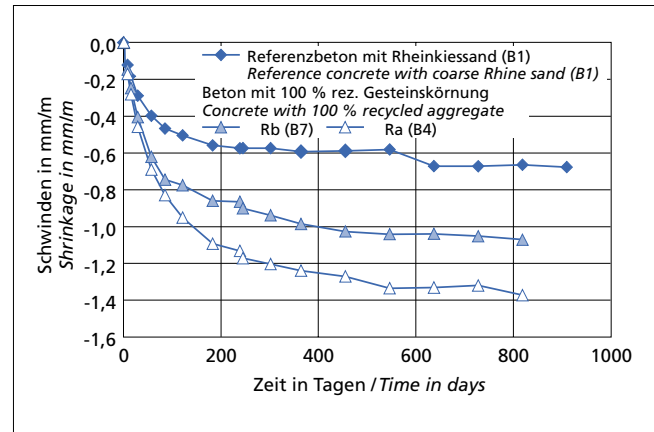


Bild 8: Schwinden des Referenzbetons (B1) und der Betone mit 100 % rezyklierter Gesteinskörnung (B4 und B7)
Figure 8: Shrinkage of the reference concrete (B1) and of the concretes with 100 % recycled aggregates (B4 and B7)

100 % Betonsplitt und Natursand eine Zunahme von 30 % zu erkennen (Bild 9). Das Kriechen des Betons mit 100 % rezyklierter Gesteinskörnung lag nach 2,5 Jahren um ca. 350 % über dem des Betons mit Rheinkiesand. Die Ursache für das gerade beim Einsatz von Brechsand deutlich höhere Kriechen ist der hohe Anteil an Zementstein und Mörtel. Besonders wirkt sich der geringere E-Modul der rezyklierten Gesteinskörnung aus.

5.3 Zementfeiner Betonbrechsand als Bestandteil der Mehlkornmatrix

Die Konsistenz der mit einer Mischung aus CEM I 42,5 R und zementfein aufgemahlenem Betonbrechsand hergestellten Betone lag in einem für Beton dieser Zusammensetzung üblichen Bereich. Es ließen sich keine signifikanten Unterschiede zu den Betonen, die nur CEM I-Zement enthielten, feststellen. Die unterschiedlichen Mahlfeinheiten des Brechsands (spez. Oberfläche 3000 cm²/g bzw. 5800 cm²/g) beeinflussten die Konsistenz ebenfalls nicht.

Die Druckfestigkeit der Betone mit zementfeinen Brechsandanteilen lag nach 28 Tagen bei Verwendung von 15 % gemahlenem Brechsand bezogen auf den Zementgehalt (Beton R2 und R3) zwischen 43 N/mm² und 46 N/mm². Die 28-Tage-Druckfestigkeit des zugehörigen Referenzbetons R1 mit CEM I 32,5 R lag bei rd. 47 N/mm². Der durch die Zugabe von gemahlenem Brechsand hervorgerufene Festigkeitsverlust konnte also fast vollständig durch die höhere Mahlfeinheit des Portlandzementanteils kompensiert

crease of 30 % compared to the reference concrete made with coarse Rhine sand was found with concrete made with 100 % concrete chippings and natural sand (Figure 9). After 2.5 years the creep of the concrete made with 100 % recycled aggregate was about 350 % higher than that of the concrete made with coarse Rhine sand. The reason for the significantly higher creep when crusher sand is used is the high percentage of hardened cement paste and mortar. The lower elastic modulus of the recycled aggregate is particularly influential.

5.3 Cement-fine concrete crusher sand as a constituent of the ultrafines matrix

The consistency of the concretes produced with a mixture of CEM I 42,5 R cement and ground, cement-fine concrete crusher sand lay in the normal range for concrete of this composition. It was not possible to detect any significant differences from concretes which contained only CEM I cement. The different finenesses of the crusher sand (specific surface area 3000 cm²/g and 5800 cm²/g) also had no influence on the consistency.

After 28 days the compressive strengths of the concretes made with cement-fine crusher sand lay between 43 N/mm² and 46 N/mm² when using 15 % ground crusher sand relative to the cement content (concretes R2 and R3). The 28 day compressive strength of the associated reference R1 made with CEM I 32,5 R was 47 N/mm². The loss in strength caused by the addition of ground

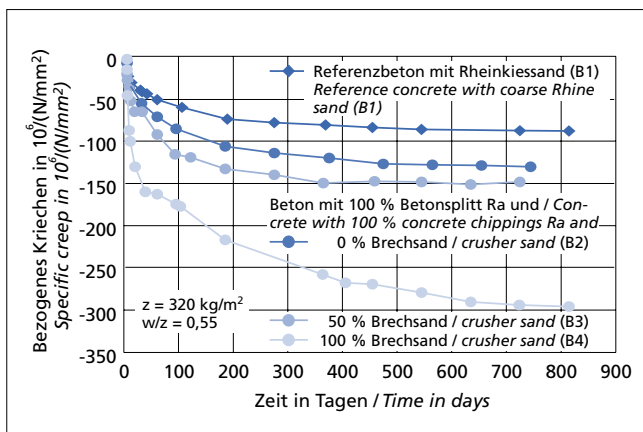


Bild 9: Kriechen des Referenzbetons (B1) und der Betone mit 100 % rezyklierter Gesteinskörnung Ra (B2, B3, B4)
Figure 9: Creep of the reference concrete (B1) and of the concretes with 100 % recycled aggregates Ra (B2, B3, B4)

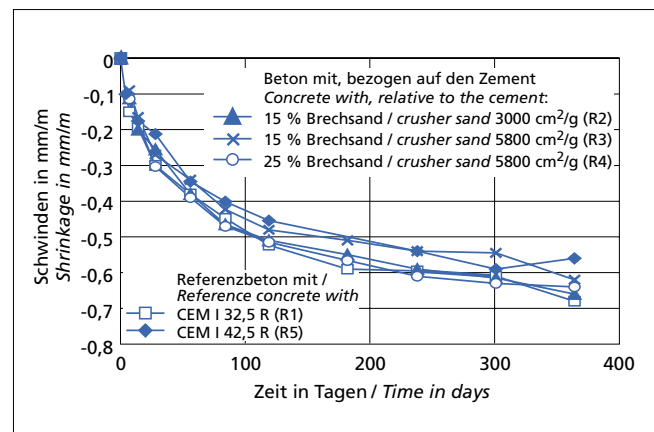


Bild 10: Schwinden der Referenzbetone (R1 und R5) und der Betone mit gemahlenem Betonbrechsand als Ersatz für einen Teil des Zements (R2, R3, R4)
Figure 10: Shrinkage of the reference concrete (R1 and R5) and of the concretes with ground concrete crusher sand as partial replacement of cement (R2, R3, R4)

werden. Ein wesentlicher Einfluss der Mahlfeinheit der rezyklierten Gesteinskörnungen auf die Betonfestigkeit konnte nicht festgestellt werden.

Die Ergebnisse der Frostprüfung unterschieden sich im Rahmen der bei Frostprüfungen unvermeidlichen Streuungen nicht signifikant voneinander. Der Gewichtsverlust der Betone mit zementfeinen Brechsandanteilen R2, R3 und R4 lag zwischen 0,5 Gew.-% und 1,6 Gew.-%. Die Prüfung des dynamischen E-Moduls nach der Frostprüfung ergab keinen Anhalt für eine innere Gefügestörung der Betone.

Da bei den Betonen mit rezyklierter Gesteinskörnung insbesondere eine Erhöhung des Brechsandanteils zu stärkerem Schwinden geführt hatte (s. 5.2.2), wurden auch im Rahmen dieser Versuchsreihe die Verformungseigenschaften des Betons mit zementfeinen Brechsandanteilen geprüft. Wie Bild 10 zeigt, lag das Schwinden der mit den zementfeinen Brechsandanteilen hergestellten Betone nach einem Jahr zwischen 0,62 mm/m und 0,66 mm/m und damit sogar noch geringfügig unterhalb der Dehnung des mit CEM I 32,5 R hergestellten Referenzbetons mit 0,68 mm/m.

6 Zusammenfassung und Folgerungen für die Praxis

Nicht nur die Leistungsfähigkeit eines Baustoffs, sondern auch die Möglichkeit ihn zu rezyklieren wird in Zukunft bei der Wahl eines geeigneten Baustoffs eine wesentliche Rolle spielen, da eine Wiederverwertung von Bauwerken oder Bauteilen häufig nicht möglich ist. Bereits beim Entwurf von Bauwerken sind deshalb die Möglichkeiten eines planmäßigen Rückbaus mit zu berücksichtigen. Der Rückbau von Gebäuden und die Aufbereitung des zurückgewonnenen Materials müssen eine weitgehend sortenreine Rückgewinnung der verwendeten Baustoffe ermöglichen.

Im Forschungsinstitut der Zementindustrie wurde der Einfluss von Betonsplitt und insbesondere von Betonbrechsand auf die Betoneigenschaften untersucht. Dazu wurden zwei Betone unterschiedlicher Festigkeit hergestellt, nach einigen Monaten gebrochen und als rezyklierte Gesteinskörnungen aufbereitet. Außerdem wurde der Einsatz eines gemahlten Brechsands als Bestandteil der Mehlkornmatrix untersucht. Die Ergebnisse können wie folgt zusammengefasst werden:

- Die rezyklierten Gesteinskörnungen aus Betonbruch waren aufgrund des anhaftenden Zementsteins porös und wiesen im Vergleich zu natürlicher Gesteinskörnung eine erhöhte Wasseraufnahme auf, die nach 10 Minuten bei Betonbrechsand (0 mm bis 4 mm) zwischen 9 % und 10 %, und bei Betonsplitt (4 mm bis 16 mm) zwischen 5 % und 6 % lag.
- Betonsplitt besteht im Allgemeinen nicht die Frostprüfung nach DIN 4226-3.
- Während der Herstellung und Verarbeitung von Beton mit Betonsplitt und Brechsand saugen die Gesteinskörnungen trotz Vornässen weiteres Wasser auf. Aus diesem Grund und wegen der rauen Oberfläche muss zur Erzielung einer ausreichenden Konsistenz eine mit zunehmendem Anteil an Betonbrechsand steigende Fließmittelmenge zugegeben werden.
- Die Druck- und Spaltzugfestigkeit wurde durch den Einsatz von Betonsplitt und -brechsand nicht wesentlich beeinflusst.
- Der Elastizitätsmodul nahm mit zunehmender Menge an rezyklierter Gesteinskörnung im Beton ab. Beim Einsatz von 100 % rezyklierter Gesteinskörnung verringerte sich der E-Modul im Vergleich zu einem Referenzbeton mit Rheinkies-sand um etwa 35 %.
- Schwinden und Kriechen des Betons wurden durch den Einsatz von Betonsplitt und insbesondere von Betonbrechsand erheblich vergrößert. Das Schwinden von Beton mit 100 % rezyklierter Gesteinskörnung lag nach 2,5 Jahren um ca. 60 % bis 100 %, das Kriechen um bis zu 350 % über den Werten des Referenzbetons.
- Die Dauerhaftigkeit von Beton mit rezyklierten Gesteinskörnungen war in etwa mit der von Beton mit Rheinkies-sand zu vergleichen. Sowohl beim Karbonatisierungsfortschritt als auch bei der Gasdurchlässigkeit ließen sich auch bei Einsatz von 100 % rezyklierter Gesteinskörnung keine signifikanten Unterschiede zu Beton mit Rheinkies-sand feststellen. Auch der Frostwiderstand des Betons mit rezyklierter Gesteinskörnung

crusher sand was therefore almost fully offset by the greater fineness of the Portland cement fraction. It was not possible to establish any essential influence of the fineness of the recycled aggregates on the concrete strength.

The results of the freeze-thaw test did not differ significantly from one another within the context of the scatter which is unavoidable in freeze-thaw tests. The weight loss of the concretes R2, R3 and R4 containing cement-fine crusher sand lay between 0.5 wt.% and 1.6 wt.%. The test of the dynamic elastic modulus after the freeze-thaw test gave no indication of internal damage to the concrete microstructure.

An increase in the proportion of crusher sand had led to greater shrinkage in concretes made with recycled aggregate (see 5.2.2) so the deformation characteristics of concrete containing cement-fine crusher sand was also tested during this test series. Figure 10 shows that after one year the shrinkage of the concretes containing cement-fine crusher sand lay between 0.62 mm/m and 0.66 mm/m and was therefore slightly below the deformation of the reference concrete produced with CEM I 32,5 R cement (0.68 mm/m).

6 Summary and practical consequences

Not only the efficiency of the building material but also the possibility of recycling it will play important roles in the future when a suitable building material is being selected, as structures and components often cannot be reused. Possible methods of planned demolition should therefore be taken into account even when structures are being designed. The demolition of buildings and the processing of the recovered materials must enable the used building materials to be recovered into their separate constituents.

The influence of concrete chippings and, in particular, of concrete crusher sand on concrete properties was investigated at the Research Institute of the Cement Industry. Two concretes of differing strength were produced, crushed after a few months, and processed as recycled aggregate. The use of ground crusher sand as a constituent of the ultrafines matrix was also investigated. The results can be summarized as follows:

- The recycled aggregates from crushed concrete were porous because of the adhering hardened cement paste and had a higher water absorption than natural aggregate; after 10 minutes this lay between 9 % and 10 % for concrete crusher sand (0-4 mm) and between 5 % and 6 % for concrete chippings (4-16 mm).
- Concrete chippings do not generally pass the freeze-thaw test specified in DIN 4226-3.
- During the production and placement of concrete made with concrete chippings and crusher sand the aggregates absorb further water in spite of pre-wetting. For this reason, and because of the rough surface, increasing quantities of superplasticizer have to be added with increasing proportion of concrete crusher sand to achieve adequate consistency.
- The compressive strength and splitting tensile strength were not substantially affected by the use of concrete chippings and crusher sand.
- The modulus of elasticity decreased with increasing quantity of recycled aggregate in the concrete. When using 100 % recycled aggregate the modulus of elasticity was about 35 % lower than in a concrete made with coarse Rhine sand.
- The shrinkage and creep of the concrete were considerably increased by the use of concrete chippings and, in particular, of concrete crusher sand. After 2.5 years the shrinkage of concrete with 100 % recycled aggregate was about 60 % to 100 % higher than the values for the reference concrete, and the creep was up to 350 % higher.
- The durability of concrete made with recycled aggregate was roughly comparable with that of concrete made with coarse Rhine sand. Even when using 100 % recycled aggregate no significant differences from concrete made with coarse Rhine sand could be detected either in the progress of carbonation or in the gas permeability. The freeze-thaw resistance of concrete made with recycled aggregate was also adequate although the concrete chippings did not have adequate freeze-thaw resistance. However, recycled aggregate particles lying on the surface of the concrete can possibly lead to pop-outs.

war ausreichend, obwohl der Betonsplitt keinen ausreichenden Frostwiderstand aufwies. Gegebenenfalls können jedoch an der Oberfläche des Betons liegende rezyklierte Gesteinskörnungen zu Abplatzungen (Pop-outs) führen.

- Wurde zementfein aufgemahlener Betonbrechsand gezielt als Bestandteil der Mehlkornmatrix eingesetzt, so waren die Betoneigenschaften bei Zugabe von 15 % feingemahltem Brechsand – bezogen auf den Zementgehalt – zu einem Beton mit einem CEM I 42,5 R vergleichbar denen eines Betons mit CEM I 32,5 R. Der gezielte Einsatz eines zementfein aufgemahlten Betonbrechsands als Bestandteil der Mehlkornmatrix ist nach diesen Versuchen durchaus denkbar und sollte in weiteren Versuchen noch genauer untersucht werden.

- When concrete crusher sand ground to cement fineness was used selectively as a component of the ultrafines matrix then the concrete properties with addition of 15 % finely ground crusher sand, relative to the cement content, to a concrete made with a CEM I 42,5 R cement, were comparable with those of a concrete made with CEM I 32,5 R. The selective use of a concrete crusher sand crushed to cement fineness as a constituent of the ultrafines matrix is, according to these tests, definitely possible and should be investigated more precisely in further tests.

Literatur / Literature

- [1] Bundesverband der Deutschen Recycling-Baustoff-Industrie (BRB), Geschäftsbericht 96/97
- [2] Bunke, N.: Prüfung von Beton-Empfehlungen und Hinweise als Ergänzung zu DIN 1048. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, H. 422, Beuth-Verlag, Berlin 1991
- [3] Car, M.: Der Baubestand als Baustofflager. Entwicklung des Baustoff-Recyclings in Deutschland und Europa, Österreichische Bauzeitung (1999), Nr. 3, S. 8
- [4] DAfStb-Richtlinie „Beton mit rezykliertem Zuschlag“, Teil 1 „Betontechnik“ und Teil 2 „Betonzuschlag aus Betonsplitt und Betonbrechsand“ (Ausgabe August 1998)
- [5] Dillmann, R.: Beton mit rezyklierten Zuschlägen, beton 2/99, S. 86–91
- [6] Eickschen, E.; Siebel, E.: Verwendung von Betonbrechsand als Zuschlag für Betonfahrbahndecken, Straße und Autobahn 9/98, S. 494–505
- [7] Breitenbücher, Rolf; Buchnik, Joachim; Eibl, Josef; Grübl, Peter; Kohler, Guntran; u.a.: Umweltgerechter Rückbau und Wiederverwertung mineralischer Baustoffe, Sachstandsbericht. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, H. 462, Beuth-Verlag, Berlin 1996
- [8] Hansen, T.: Recycled aggregates and recycled aggregate concrete. Second state-of-the-art report. RILEM. Matériaux et Constructions, Vol. 19 (1986), Nr. 111, S. 201–246
- [9] Lukas, W.: Konzept für die Herstellung von Recycling-Beton aus Baurestmassen-Zuschlägen, Betonwerk + Fertigteile-Technik (1994), Nr. 10, S. 68–75
- [10] Rahlwes, K.: Recycling von Stahlbeton- und Stahlverbundkonstruktionen – Ansätze zu einer umweltökologischen Bewertung. Wiesbaden: Deutscher Beton-Verein, 1992. – In: Vorträge auf dem Deutschen Betontag 1991 vom 25 bis 27. April 1991 in Berlin, S. 215–247
- [11] Schmidt Consult (Hrsg.): Technische, ökologische und wirtschaftliche Einflüsse auf die derzeitigen und zukünftigen Mengen an rezyklierten Baustoffen, Gutachten im Auftrag des Bundesverbandes Steine und Erden e.V., Heidelberg 1999
- [12] Schulz, R.-R.: Recycling von Baurestmassen: ein Beitrag zur Kostendämpfung im Bauwesen, Dissertation ibac, Aachen 1986