

Winfried Neufert, Ines Reuken, Erwitte, Christoph Müller, Sebastian Palm, Düsseldorf,
Carl-Alexander Graubner, Tilo Proske, Moien Rezvani, Darmstadt

Leistungsfähigkeit klinkereffizienter Zemente mit Hüttensand und Kalkstein

Performance of clinker-efficient cements containing granulated blastfurnace slag and limestone

Übersicht

In einem von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt e. V. (DBU) geförderten Forschungsvorhaben wurden Zemente innerhalb eines umfangreicheren Zusammensetzungsfelds im Dreistoffsystem Klinker (K) – Hüttensand (S) – Kalkstein (LL) untersucht. Die Dauerhaftigkeiten von Betonen mit Zementen in Grenzzusammensetzungen der derzeit vorgesehenen Erweiterung der DIN EN 197-1 und darüber hinaus wurden geprüft.

Es zeigte sich, dass Zemente mit einem Portlandzementklinkergehalt von rd. 50 M.-% unter Verwendung der weiteren Hauptbestandteile Hüttensand und Kalkstein prinzipiell zur Herstellung von Konstruktionsbetonen geeignet sind: Diese Zemente führten zu praxisingerechten Frischbetoneigenschaften, guten mechanischen Eigenschaften und, mit Ausnahme des Frost-Widerstands, zu zulassungsfähigen Dauerhaftigkeitseigenschaften im Rahmen der heute gültigen deskriptiven Regeln der DIN 1045-2.

Betone mit Zementen jenseits des Bereichs der derzeit vorgesehenen Erweiterung der DIN EN 197-1 mit einem Portlandzementklinkergehalt von rd. 20 bis 35 M.-% und den weiteren Hauptbestandteilen Hüttensand und Kalkstein können ebenfalls zulassungsfähige Dauerhaftigkeitseigenschaften aufweisen, wenn neben der granulometrischen Abstimmung der Hauptbestandteile anspruchsvolle betontechnologische Maßnahmen (wasserarmer Beton mit einem geringen Wasserzementwert und entsprechenden Zusatzmitteldosierungen) in der Betonherstellung zur Anwendung kommen.

1 Einleitung

Die Untersuchungen dieses Forschungsvorhabens bauen auf den Ergebnissen des abgeschlossenen Vorhabens „Reduzierung der Umweltwirkung der Betonbauweise durch Zemente mit hohem Kalksteingehalten“ [1, 2] auf und geben Hinweise bzgl. der Verwendung neuer Zemente gemäß der überarbeiteten europäischen Zementnorm EN 197-1.

In [1, 2] wurde festgestellt, dass Zemente mit bis zu 50 M.-% Kalkstein als Hauptbestandteil zur Herstellung von Betonen mit zulassungsfähigen Dauerhaftigkeitseigenschaften verwendet werden können. Hierzu war es erforderlich, den Wasserzementwert auf $w/z = 0,35$ abzusenken. Um eine praxisingerechte Verarbeitbarkeit zu erreichen, war neben der gezielten Abstimmung der Zementhauptbestandteile im Zementwerk der auf den Zement abgestimmte Einsatz der Betonzusatzmittel bei angemessenem Leimgehalt ein Schlüssel zum Erfolg.

Weiterhin zeigte sich, dass bei bestimmten Dauerhaftigkeitseigenschaften (z.B. beim Chlorideindringwiderstand) im Hinblick auf besonders exponierte Umgebungsbedingungen noch Optimierungspotential besteht. Auch die Umweltwirkung (ökobilanzielle Betrachtung) kann weiter verbessert werden. Gerade mit Blick auf den Chlorideindringwiderstand wird dies möglich durch den Einsatz von Hüttensand als drittem Hauptbestandteil. In diesem Forschungsvorhaben wurde im Vergleich zu [1, 2] ein entsprechend umfangreicheres Zusammensetzungsfeld im Dreistoffsystem Klinker (K) – Hüttensand (S) – Kalkstein (LL) untersucht (vgl. Bild 1).

Abstract

Cements lying within an extensive range of compositions in the ternary system consisting of clinker (K), granulated blastfurnace slag (S) and limestone (LL) were investigated in a research project sponsored by the German Federal Environmental Foundation. Tests were carried out on the durability of concretes made with cements within the composition limits of the currently envisaged extension of DIN EN 197-1 and beyond.

It was found that cements with a Portland cement clinker content of about 50 mass % using granulated blastfurnace slag and limestone as the other main constituents are suitable, in principle, for producing structural concretes. These cements gave fresh concrete properties as used in practice, good mechanical properties and, with the exception of freeze-thaw resistance, admissible durability properties within the framework of the currently valid descriptive rules of DIN 1045-2.

Concretes made with cements lying outside the range of the currently envisaged extension of DIN EN 197-1 with a Portland cement clinker content of about 20 to 35 mass % with granulated blastfurnace slag and limestone as the other main constituents can also exhibit admissible durability properties provided not only granulometric matching of the main constituents but also exacting concrete technology measures (low-water concrete with low water/cement ratio and corresponding addition levels of admixtures) are applied in the concrete production.

1 Introduction

The studies conducted in the context of this research project build on the results of the completed project “Reducing the environmental impact of concrete construction through the use of cements with a high limestone content” [1, 2] and provide information regarding the use of new cements in accordance with the revised European cement standard EN 197-1.

In [1, 2] it was established that cements with up to 50 mass % limestone as main constituent can be employed to produce concretes with admissible durability properties. This involved having to reduce the water-cement ratio to $w/c = 0.35$. In addition to the specific adjustment of the main cement constituents at the cement plant, a further key to achieving practicable workability was the use of concrete admixtures suited to the cement, along with an appropriate paste content. It also became apparent that potential for optimisation still exists with regard to certain durability properties (e.g. resistance to chloride penetration) in the case of environmental conditions involving particularly high exposure levels. There is also scope for further improvement in terms of the environmental impact (life cycle assessment). For resistance to chloride penetration in particular, this can be achieved through the use of granulated blast furnace slag as third main constituent. By contrast with [1, 2], this research project accordingly investigated a more extensive composition range in the ternary system consisting of clinker (K) granulated blast furnace slag (S) limestone (LL) (Fig. 1).

The composition of the cements was based on the key points of the planned extension to EN 197-1. The durability of the concretes

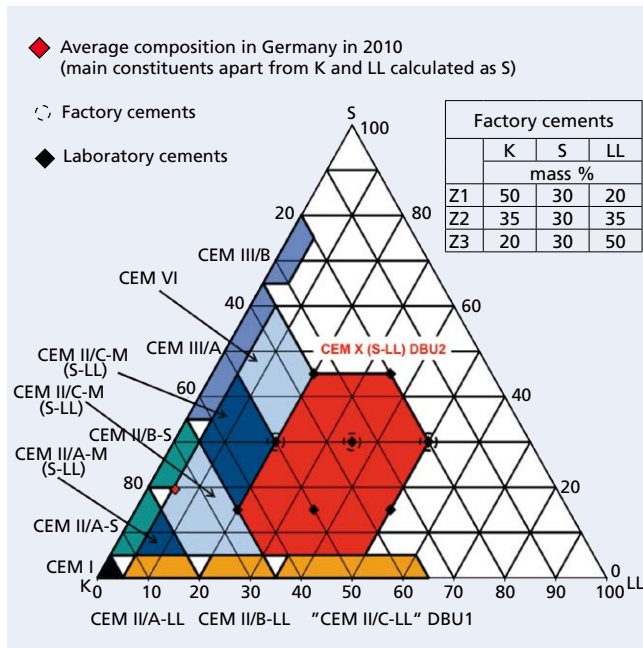


Bild 1: Untersuchungsrahmen, dargestellt im Dreistoffsystem des Zements, zusammengesetzt aus Portlandzementklinker (K), Hüttensand (S) und Kalkstein (LL)

Figure 1: Framework of the investigation, shown as a ternary cement system consisting of Portland cement clinker (K), granulated blastfurnace slag (S) and limestone (LL)

Die Zusammensetzung der Zemente orientierte sich an den Eckpunkten der geplanten Erweiterung der EN 197-1. Die Dauerhaftigkeit der Betone wurde mit den Methoden untersucht, die sich im vorangegangenen Forschungsvorhaben bewährt hatten und im Übrigen im Rahmen von Zulassungen relevant wären. Diese wurden durch die Schnellcarbonatisierung und die Prüfung des Frost-Tausalz-Widerstandes ergänzt.

2 Versuche

2.1 Zemente und Zementhauptbestandteile

Ein CEM I 52,5 R, ein CEM I 42,5 N und ein CEM III/A 42,5 N der Firma Spennert Zement wurden als Referenz- bzw. Ausgangszemente verwendet. Die Prüfzemente wurden durch Mischen eines CEM I 52,5 R mit den gesondert gemahlten vier Hüttensanden bzw. einem gemahltem Kalkstein hergestellt. Die Zemente werden nach folgendem Prinzip bezeichnet:

CEM (50K, 30S, 20 LL) – 50 M.-% CEM I 52,5 R, 30 M.-% Hüttensand, 20 M.-% Kalkstein.

Für die Mörtelversuche erfolgte das Mischen der Komponenten im Labor. Für die Betonversuche wurden werkseitig produzierte Zemente verwendet. Die untersuchten Zemente sind in Bild 1 eingetragen.

2.2 Mörtel Eigenschaften

Die Mörteldruckfestigkeiten der in Bild 1 mit Rauten markierten Zemente wurden ermittelt. Die vollständigen Ergebnisse können dem Abschlussbericht entnommen werden. Die Druckfestigkeit sowohl von Normmörteln als auch von Mörteln mit abweichenden Zementgehalten und Wasserzementwerten wurde nach 2, 7, 28 und 91 Tagen gemäß DIN EN 196-1 geprüft (Bild 2). Normmörtel mit einem Wasserzementwert von $w/z = 0,50$ wurden gemäß DIN EN 196-1 prinzipiell ohne die Verwendung von Fließmitteln mit einem Zementgehalt von 450 g je Mischung hergestellt. Mörtel mit einem Wasserzementwert von $w/z = 0,40$ wurden, um einen konstanten Leimgehalt von rd. 420 l/m^3 beizubehalten, mit einem Zementgehalt von 500 g je Mischung hergestellt, Mörtel mit $w/z = 0,35$ mit 535 g je Mischung. Ein PCE-basiertes Fließmittel wurde verwendet, um ein konstantes Ausbreitmaß von $160 \pm 10 \text{ mm}$ zu erzielen. Im Folgenden sind beispielhaft die Ergebnisse

was studiert wurde mit den gleichen Methoden wie in den vorherigen Forschungsprojekten, die ebenfalls relevant waren hinsichtlich der technischen Genehmigung. Diese wurden durch beschleunigte Carbonatisierung und Prüfung der Frost-Tausalz-Widerstande mit Gefrier-Tausalz ergänzt.

2 Tests

2.1 Zemente und Zement Hauptbestandteile

Ein CEM I 52,5 R, ein CEM I 42,5 N und ein CEM III/A 42,5 N von der Spennert Zement-Fabrik wurden als Referenz- bzw. Ausgangszemente verwendet. Die Prüfzemente wurden durch Mischen eines CEM I 52,5 R mit den vier separat gemahlten Granulierten Hüttensanden und Kalkstein hergestellt. Das Prinzip der Zementbezeichnungen ist wie folgt: CEM (50K, 30S, 20 LL) 50 mass % CEM I 52,5 R, 30 mass % Granuliertes Hüttensand, 20 mass % Kalkstein. Die Komponenten wurden im Labor für die Mörtelversuche gemischt. Die untersuchten Zemente sind in Bild 1 dargestellt.

2.2 Mörtel Eigenschaften

Die Mörtelzugfestigkeiten der mit den Rauten in Bild 1 markierten Zemente wurden bestimmt. Die vollständigen Ergebnisse sind im Abschlussbericht zu finden. Die 2, 7, 28 und 91-tägigen Zugfestigkeiten von Standardmörteln und Mörteln mit unterschiedlichen Zementgehalten und Wasserzementverhältnissen wurden gemäß DIN EN 196-1 (Bild 2) bei einem Wasserzementverhältnis von $w/c = 0,50$ ohne Verwendung von Superplastizisatoren mit einem Zementgehalt von 450 g pro Mischung hergestellt. In order to maintain a constant paste content of around 420 l/m^3 , mortars with a water-cement ratio of $w/c = 0,40$ were produced with a cement content of 500 g per mixture and mortars with $w/c = 0,35$ with 535 g per mixture. Ein PCE-basierendes Superplastizierer wurde verwendet, um ein konstantes Fließmaß von $160 \pm 10 \text{ mm}$ zu erzielen. Die Ergebnisse für die fabrikproduzierten Zemente 1-3 (siehe Bild 1) sind unten als Beispiel für die Mörtelversuche dargestellt. Die Auswahl der Zemente basierte auf den folgenden Kriterien:

- In einem Standardmörtel mit $w/c = 0,50$, das Zement CEM (50 K, 30 S, 20 LL) "Z1" zeigte Festigkeiten, die denen der Referenzzemente CEM I 42,5 N und CEM III/A 42,5 N in Standardmörtel mit $w/c = 0,50$ entsprechen. Das Zement "1" in Bild 1 repräsentiert die "Grenzkomposition" zwischen den Zementen CEM II/C-M (SLL) und CEM VI, die in der zukünftigen EN 197-1 standardisiert werden sollen und den neuen Kompositionsbereich in Bild 1 rot hervorgehoben.
- In einem Mörtel mit $w/c = 0,40$, das Zement CEM (35 K, 30 S, 35 LL) "Z2" zeigte Festigkeiten, die denen der Referenzzemente CEM I 42,5 N und CEM III/A 42,5 N in Standardmörtel mit $w/c = 0,50$ entsprechen.
- Mit einem Kalksteinanteil von 50 mass %, das Zement CEM (20 K, 30 S, 50 LL) "Z3" hat den maximalen Kalksteinanteil, der in [1, 2] für Zemente, die mit Anpassungen der Beton-Technologie, akzeptable Dauerhaftigkeitseigenschaften im Beton zeigen.

2.3 Betonversuche

2.3.1 General

Für die Betone, wurde das Wasserzementverhältnis variiert, während der gleiche Pastengehalt und ein Fließmaß von $500 \pm 20 \text{ mm}$ beibehalten wurden. Tabelle 1 zeigt die Betonzusammensetzungen. Rhyngestein und Sand mit A16/B16 Abstufungskurve wurden als Aggregate verwendet.

2.3.2 Betonzugfestigkeit

Die 1, 7 und 28-tägigen Zugfestigkeiten der Betone B1 bis B3 wurden gemäß DIN EN 12390-3 an Würfeln mit einer Kantenlänge von 150 mm nach 6 Tagen in Wasser (Ausnahme: 1-d-Werte) bestimmt. Die Ergebnisse sind in Bild 3 dargestellt.

Das Beton B1 mit Zement Z1 (50 mass % CEM I) zeigt Festigkeiten, die denen der Betone B1 mit den Referenzzementen entsprechen. Wie zu erwarten, sinkt die Festigkeit mit

der werkseitig produzierten Zemente 1–3 (vgl. Bild 1) dargestellt, die für die Betonversuche ausgewählt wurden. Die Auswahl der Zemente erfolgte anhand folgender Kriterien:

- Der Zement CEM (50 K, 30 S, 20 LL) „Z1“ zeigte in einem Normmörtel mit $w/z = 0,50$ vergleichbare Festigkeiten wie die Referenzzemente CEM I 42,5 N und CEM III/A 42,5 N im Normmörtel mit $w/z = 0,50$. Der in Bild 1 mit „1“ bezeichnete Zement stellt die „Grenzzusammensetzung“ zwischen den zukünftig in EN 197-1 genormten Zementen CEM II/C-M (S-LL) und CEM VI sowie dem in Bild 1 rot dargestellten neuen Zusammensetzungsfeld dar.
- Der Zement CEM (35 K, 30 S, 35 LL) „Z2“ zeigte in einem Mörtel mit $w/z = 0,40$ vergleichbare Festigkeiten wie die Referenzzemente CEM I 42,5 N und CEM III/A 42,5 N im Normmörtel mit $w/z = 0,50$.
- Der Zement CEM (20 K, 30 S, 50 LL) „Z3“ weist mit einem Kalksteingehalt von 50 M.-% den in [1, 2] ermittelten maximalen Kalksteingehalt für solche Zemente auf, die mit angepasster Betontechnologie im Beton zulassungsfähige Dauerhaftigkeitseigenschaften zeigten.

2.3 Betonversuche

2.3.1 Allgemeines

Für die Betone wurde der Wasserzementwert unter Beibehaltung des Leimgehalts variiert und durch die Verwendung von Fließmitteln ein Ausbreitmaß von 500 ± 20 mm eingestellt. Tabelle 1 zeigt die verwendeten Betonzusammensetzungen. Als Gesteinskörnung wurde Rheinkiesand der Sieblinie A16/B16 verwendet.

2.3.2 Betondruckfestigkeit

Die Betondruckfestigkeit der Betone B1 bis B3 wurde nach DIN EN 12390-3 im Alter von 1, 7 und 28 Tagen an Würfeln mit einer Kantenlänge von 150 mm nach 6 Tagen Wasserlagerung (Ausnahme 1-d-Werte) bestimmt. Die Ergebnisse zeigt Bild 3.

Der Beton B1 mit Zement Z1 (50 % CEM I) zeigte vergleichbare Festigkeiten wie die Betone B1 mit den Referenzzementen. Mit weiter abnehmendem Klinkergehalt sank die Festigkeit zu allen Prüfzeitpunkten erwartungsgemäß. Die Betone B2 mit Zement Z2 bzw. B3 mit Zement Z3 wiesen zwar etwas höhere Festigkeiten auf als die Referenzbetone, die Festigkeit des Betons alleine ist jedoch kein hinreichendes Merkmal für alle Dauerhaftigkeitseigenschaften.

2.3.3 Carbonatisierung

Die Carbonatisierungstiefe wurde an Feinbetonprismen mit den Abmessungen 40 mm x 40 mm x 160 mm und einer Sieblinie A8/B8 durchgeführt. Dies entspricht den Randbedingungen in Zulassungsverfahren des Deutschen Instituts für Bautechnik (DIBt) für Zemente. Mörtel mit einem Wasserzementwert von $w/z = 0,50$ wurden ohne die Verwendung von Fließmitteln mit

Tabelle 1: Betonzusammensetzungen

Table 1: Concrete compositions

	Concrete B1	Concrete B2	Concrete B3
Cement content in kg/m^3	320	365	390
Water/cement ratio	0.50	0.40	0.35
Content of air voids in %	Not specified		
Paste content incl. aggregate fraction < $125 \mu\text{m}$ in l/m^3	290 ± 5	290 ± 5	290 ± 5
Flow table spread in mm	500 ± 20	500 ± 20	500 ± 20

test ages with further decreasing clinker content. The concretes B2 with cement Z2 and B3 with cement Z3 reveal somewhat greater strengths than the reference concretes, but the strength of the concrete alone is not an adequate indicator for all durability properties.

2.3.3 Carbonation

The carbonation depth was studied on fine concrete prisms measuring 40 mm x 40 mm x 160 mm with A8/B8 grading curve. This corresponds to the boundary conditions in the German Institute for Construction Technology (DIBt) approval processes for cements. Mortars with a water-cement ratio of $w/c = 0.50$ were produced without the use of superplasticizers with a cement content of 450 g per mixture (in accordance with DIN EN 196-1). In order to maintain a constant paste content, mortars with a water-cement ratio of $w/c = 0.40$ were produced with a cement content of 500 g per mixture. For mortars with $w/c = 0.35$, use was made of 535 g of cement per mixture. Half the prisms were subjected to 7 days of pre-storage in water at a temperature of $(20 \pm 1) ^\circ\text{C}$, whereas the other half was stored in water for 28 days at a temperature of $(20 \pm 1) ^\circ\text{C}$. The test specimens were subsequently stored at a temperature of $(20 \pm 2) ^\circ\text{C}$ and a relative humidity of $(65 \pm 5) \%$. The carbonation depths after 140 days' storage with a CO_2 concentration of 0.04 % are shown in Fig. 4. The carbonation rates are given in $\text{mm/a}^{0.5}$. This unit corresponds to the current status of discussions regarding the definition of possible carbonation classes in European standardisation.

In Fig. 5 the carbonation rates are classified in the evaluation background in accordance with Appendix B in [3]. The unit used here is $\text{mm/d}^{0.5}$. Mortars not shown have compressive strengths which are too high for the given scaling (see Fig. 2). After 7 days of pre-storage, the mortars – possibly with adapted water-cement ratios – are below the limit value function marked with a black line. Following 28 days of pre-storage, the results are in the vicinity of

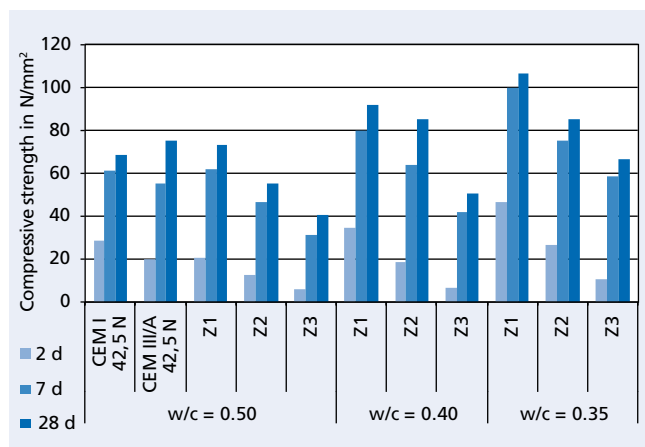


Bild 2: Mörteldruckfestigkeiten

Figure 2: Mortar compressive strengths

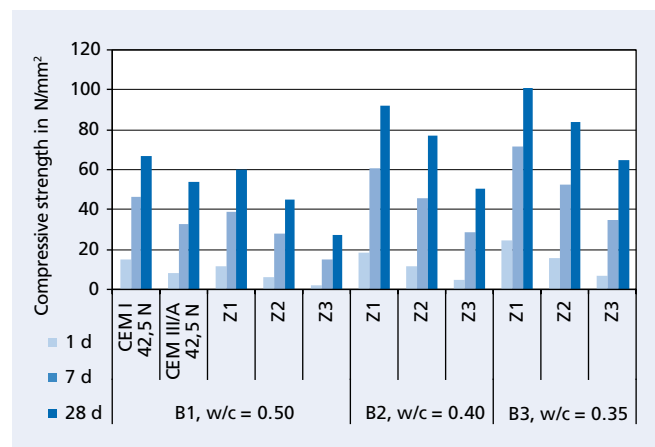


Bild 3: Druckfestigkeitsentwicklung der Betone B1 bis B3

Figure 3: Compressive strength development of concretes B1 to B3

einem Zementgehalt von 450 g je Mischung hergestellt (gemäß DIN EN 196-1). Mörtel mit einem Wasserzementwert von $w/z = 0,40$ wurden, um einen konstanten Leimgehalt beizubehalten, mit einem Zementgehalt von 500 g je Mischung hergestellt. Für Mörtel mit $w/z = 0,35$ wurden 535 g Zement je Mischung verwendet. Jeweils die Hälfte der Prismen wurde 7 Tage in Wasser mit einer Temperatur von $(20 \pm 1)^\circ\text{C}$ vorgelagert, die andere Hälfte lagerte 28 Tage in Wasser mit einer Temperatur von $(20 \pm 1)^\circ\text{C}$. Anschließend lagerten die Probekörper bei einer Temperatur von $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ und einer relativen Feuchte von $(65 \pm 5)\%$. Die Carbonatisierungstiefen nach 140 Tagen Lagerung bei einer CO_2 -Konzentration von 0,04 % sind in Bild 4 dargestellt. Die Carbonatisierungsgeschwindigkeiten sind in $\text{mm}/\text{a}^{0,5}$ angegeben. Diese Einheit entspricht dem derzeitigen Diskussionsstand über die Definition von möglichen Carbonatisierungsklassen in der europäischen Normung.

the limit value or, in one case, above it. Most of the mortars and cements exhibit admissible carbonation rates.

2.3.4 Resistance to chloride penetration

The resistance of the concrete to the penetration of chlorides was determined using a rapid test method (migration test: [4, 5]). The 35 and 98-day test results can be seen in Fig. 6.

Irrespective of the water-cement ratio, all concretes with test cements exhibit low chloride migration coefficients – i.e. high resistance to the penetration of chlorides. It was thus possible to eliminate a significant “weakness” of the cements investigated in [1, 2], which contained only limestone as further main constituent. In the cements studied in the research project, a granulated blast furnace slag content of 30 mass % was sufficient to assure a high resistance to chloride penetration for hydraulic engineering

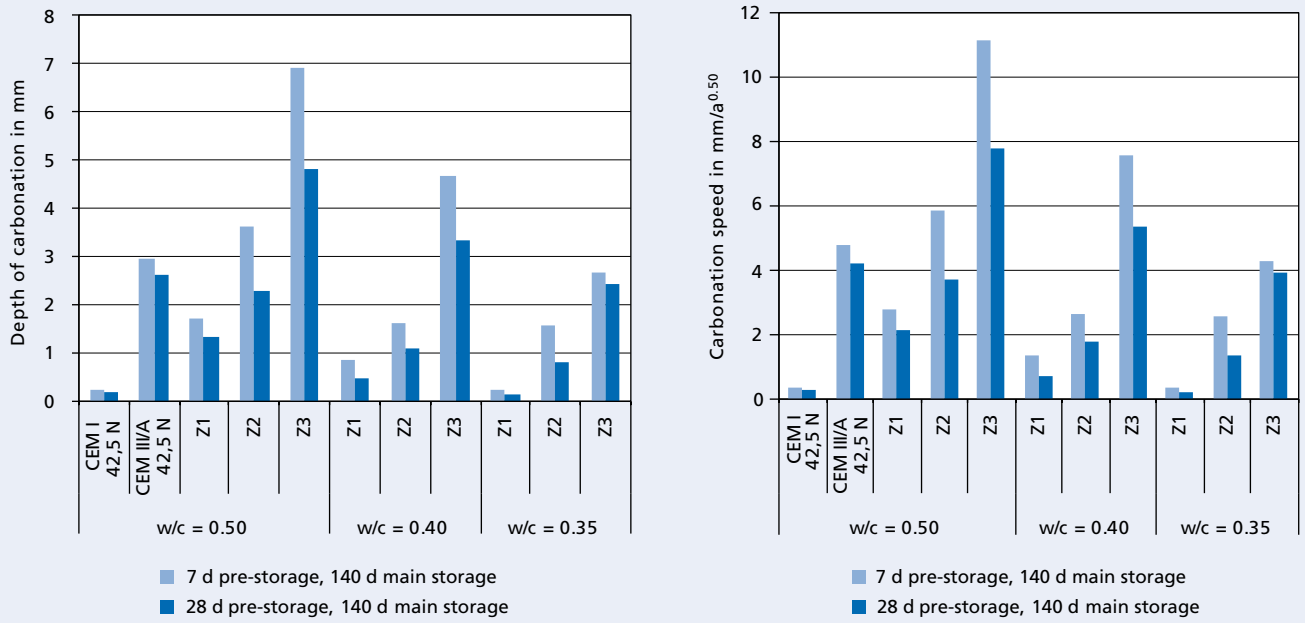


Bild 4: Carbonatisierungstiefen und -geschwindigkeiten von Feinbetonen nach 140 d Hauptlagerung
 Figure 4: Depths and speeds of carbonation in fine concretes after 140 days of main storage

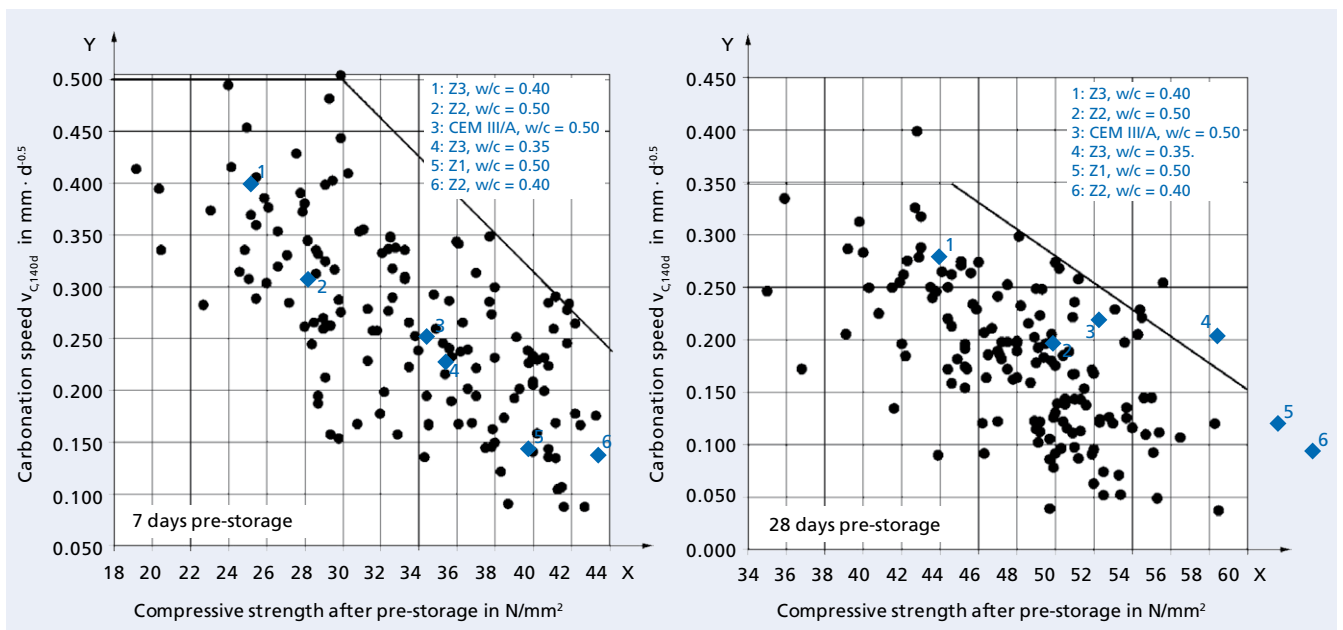


Bild 5: Einordnung in den Bewertungshintergrund gemäß Anhang B in [3]
 Figure 5: Classification in the evaluation background in accordance with Appendix B in [3]

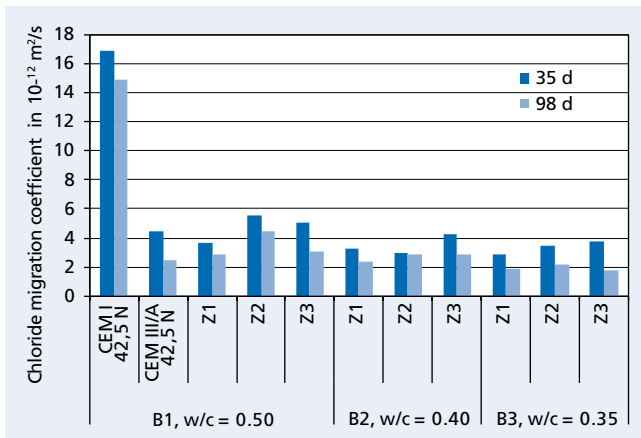


Bild 6: Chlorideindringwiderstand der Betone B1 bis B3
Figure 6: Chloride penetration resistance of concretes B1 to B3

In Bild 5 sind die Carbonatisierungsgeschwindigkeiten in den Bewertungshintergrund gemäß Anhang B in [3] eingeordnet. Die hier verwendete Einheit ist $\text{mm}/\text{d}^{0.5}$. Nicht eingezeichnete Mörtel haben zu hohe Druckfestigkeiten für die vorgegebene Skalierung (vgl. Bild 2). Die Mörtel – ggf. mit angepassten Wasserzementwerten – liegen bei einer Vorlagerung von 7 Tagen unterhalb der mit einer schwarzen Linie gekennzeichneten Grenzwertfunktion. Bei einer Vorlagerung von 28 Tagen liegen die Ergebnisse im Bereich des Grenzwertes bzw. in einem Fall darüber. Die Mörtel bzw. Zemente weisen in den meisten Fällen zulassungsfähige Carbonatisierungsgeschwindigkeiten auf.

2.3.4 Chlorideindringwiderstand

Der Widerstand des Betons gegenüber eindringenden Chloriden wurde mithilfe eines Schnellverfahrens (Migrationstest: [4, 5]) ermittelt. Die Prüfergebnisse im Alter von 35 Tagen bzw. 98 Tagen zeigt Bild 6.

Alle Betone mit Prüfzementen weisen unabhängig vom Wasserzementwert geringe Chloridmigrationskoeffizienten – d.h. hohe Widerstände gegen das Eindringen von Chloriden – auf. Damit konnte eine wesentliche „Schwäche“ der in [1, 2] untersuchten Ze-

applications for example ($\leq 10 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ for XS1-2, XD1-2 or $\leq 5 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ for XS3, XD3 in accordance with [6]).

2.3.5 Freeze-thaw resistance

The freeze-thaw resistance of concretes was tested using the CIF method in accordance with CEN/TR 15177. Scaling and the relative dynamic modulus of elasticity were determined. The results are shown in Figs. 7 and 8 as mean values for five test specimens in each case.

In the case of unsuitable starting materials or an unsuitable concrete composition, freeze-thaw attack without the action of thawing agents can generally be expected to result primarily in internal microstructural damage. According to [5], this can be described by the relative dynamic modulus of elasticity.

Fig. 7 shows that, when used in the concrete B1, the test cements Z1-Z3 lead to scaling or a relative dynamic modulus of elasticity above or below the assessment criterion. Lowering of the water-cement ratio to $w/c = 0.40$ resulted in a significantly smaller reduction in the relative dynamic modulus of elasticity. The concrete with cement 1 is above the assessment criterion. If the water-cement ratio is further lowered to $w/c = 0.35$, the concretes with cement 2 and cement 3 are also above the assessment criterion (Fig. 8). The scaling criterion is always satisfied for water-cement ratios $w/c < 0.50$.

2.3.6 Tensile splitting strength and modulus of elasticity

The results obtained from testing of the modulus of elasticity in accordance with DIN 1048-5:1991-06 and of the tensile splitting strength in accordance with DIN EN 12390-5:2009-07 are presented in Figs. 9 and 10. The tests were performed at a concrete age of 28 days. The modulus of elasticity and the tensile splitting strength of the concretes were within the expected range in accordance with DIN EN 1992-1-1.

2.3.7 Creep and shrinkage

Creep and shrinkage measurements on cylinders with diameter = 158 mm and $h = 300 \text{ mm}$ were taken on two cylinders in each case in accordance with DAfStb (German Committee for Structural Concrete) Issue 422, Section 2.6. After casting, the test specimens were left in the formwork for one day, then stored under water until the 7th day before being subsequently stored at a temperature of $20 \text{ }^\circ\text{C}$ and a relative humidity of $(65 \pm 2) \%$. The shrinkage meas-

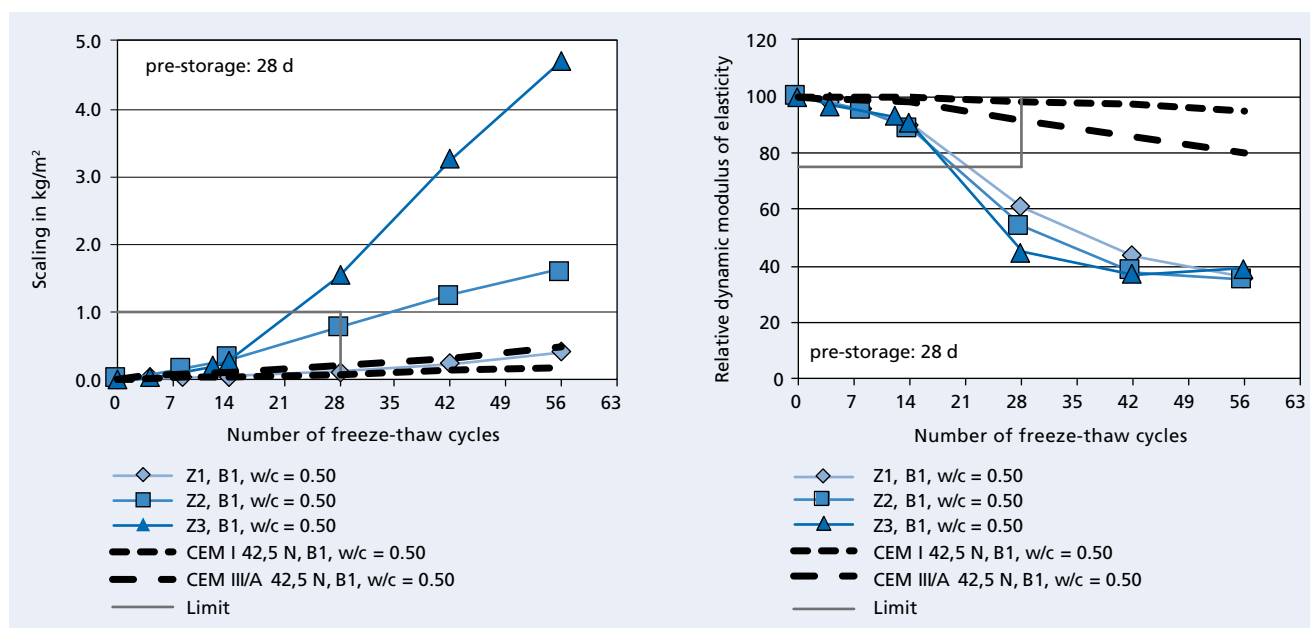


Bild 7: Abwitterung und rel. dyn. E-Modul von Betonen mit Wasserzementwerten $w/z = 0,50$; 28-d-Vorlagerung
Figure 7: Scaling and relative dynamic elastic modulus of concretes with water/cement ratios $w/c = 0.50$; 28 d pre-storage

mente, die ausschließlich Kalkstein als weiteren Hauptbestandteil enthielten, beseitigt werden. Ein Hüttensandgehalt von 30 M.-% Hüttensand war bei den im Forschungsvorhaben untersuchten Zementen ausreichend, um einen hohen Chlorideindringwiderstand für Anwendungen z.B. im Wasserbau ($\leq 10 \cdot 10^{-12} \text{ m/s}^2$ für XS1-2, XD1-2 bzw. ($\leq 5 \cdot 10^{-12} \text{ m/s}^2$ für XS3, XD3 gemäß [6])) sicherstellen zu können.

2.3.5 Frostwiderstand

Der Frostwiderstand von Betonen wurde mittels des CIF-Verfahrens gemäß CEN/TR 15177 bestimmt. Die Abwitterung und der relative dynamische E-Modul wurden ermittelt. Die Ergebnisse zeigen die Bilder 7 und 8 als Mittelwerte von jeweils fünf Prüfkörpern.

Beim Frostangriff ohne Einwirkung von Taumitteln ist bei nicht geeigneten Ausgangsstoffen bzw. nicht geeigneter Betonzusammensetzung i.d.R. hauptsächlich mit einer inneren Gefügeschädigung zu rechnen. Diese kann gemäß [5] durch den relativen dynamischen E-Modul beschrieben werden.

Bild 7 zeigt, dass die Prüfzemente Z1-Z3 bei Verwendung im Beton B1 zu Abwitterungen bzw. einem relativen dynamischen E-Modul oberhalb bzw. unterhalb des Bewertungskriteriums führen. Eine Absenkung des Wasserzementwertes auf $w/z = 0,40$ führte zu einer deutlich geringeren Abnahme des relativen dynamischen E-Moduls. Der Beton mit Zement 1 liegt oberhalb des Bewertungskriteriums. Bei einer weiteren Absenkung des Wasserzementwertes auf $w/z = 0,35$ liegen auch die Betone mit Zement 2 und Zement 3 oberhalb des Bewertungskriteriums (Bild 8). Das Abwitterungskriterium wird für Wasserzementwerte $w/z < 0,50$ in jedem Fall eingehalten.

2.3.6 Spaltzugfestigkeit und Elastizitätsmodul

Ergebnisse zur Prüfung des E-Moduls nach DIN 1048-5:1991-06 und zur Spaltzugfestigkeit nach DIN EN 12390-5:2009-07 sind in den Bildern 9 und 10 dargestellt. Die Prüfungen erfolgten im Betonalter von 28 Tagen. Der E-Modul und die Spaltzugfestigkeit der Betone lagen im zu erwartenden Bereich nach DIN EN 1992-1-1.

urements were taken after six days of storage in water up to an age of 168 days following removal from storage.

The creep stress of $\sigma_u = 1/3 f_{c,cyl}$ was applied at an age of 28 days. Creep measurements were taken up to an age of 140 days after loading.

The shrinkage strain behaviour patterns measured are shown in Fig. 11. A certain swelling of the concrete with blast furnace cement can initially be seen during water storage. With a water-cement ratio $w/c = 0.50$, the strain values of the concrete with Z1 are “in the middle” of the range “spanned” by the concretes with the reference cements CEM I and CEM III/ A. The shrinkage strain of the concretes with lower water-cement ratios and cements Z2 and Z3 is between that of CEM I and CEM III/ A with $w/c = 0.50$.

The creep strain behaviour patterns measured are shown in Fig. 12. These show creep shortening only and do not contain any elastic shortening or shrinkage shortening. The shortening values relate to the initial measurement immediately after the start of loading. The creep shortening of the concretes with cements containing several main constituents is always less than the creep shortening of the concrete with the Portland cement CEM I. With the same water-cement ratio $w/c = 0.50$, the creep shortening of the concrete with Z1 is in the range of the values for the concrete with CEM III/A. The two cements have a comparable clinker content of approx. 50 mass %.

Comparison of the measured values with the calculated shrinkage deformation and creep coefficients of the concretes studied (Figs. 13 and 14) shows that the measured shrinkage deformation and creep coefficients of all concretes are well below the specifications of Eurocode 2 and Model Code 2010.

2.3.8 Robustness

The topic of “Robust concrete properties for construction sites” is one of the major areas of discussion with regard to the evolution of the regulations for concrete construction. The influence of water content fluctuations as encountered in practice on selected hardened concrete properties was studied within the context of this project.

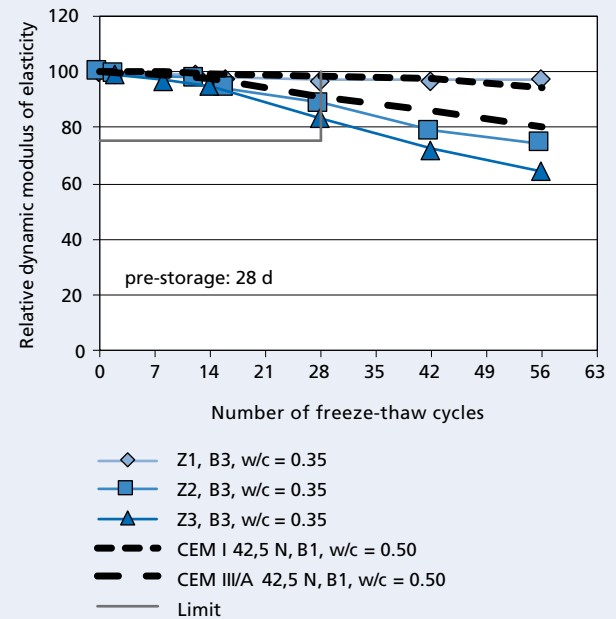
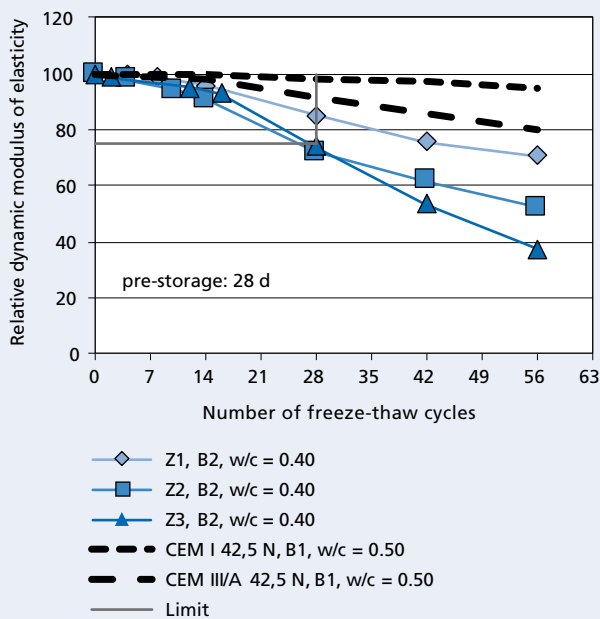


Bild 8: Rel. dyn. E-Modul von Betonen mit Wasserzementwerten $w/z = 0,40$ und $w/z = 0,35$ (Referenzen mit $w/z = 0,50$); 28 d Vorlagerung
 Figure 8: Relative dynamic elastic modulus of concretes with water/cement ratios $w/c = 0.40$ and $w/c = 0.35$; 28 d pre-storage (reference concretes with $w/c = 0.50$); 28 d pre-storage

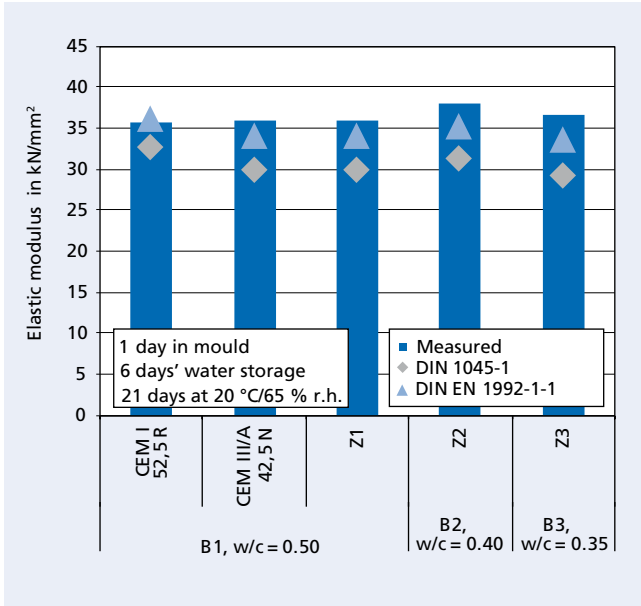


Bild 9: Darstellung des E-Moduls
Figure 9: Elastic modulus

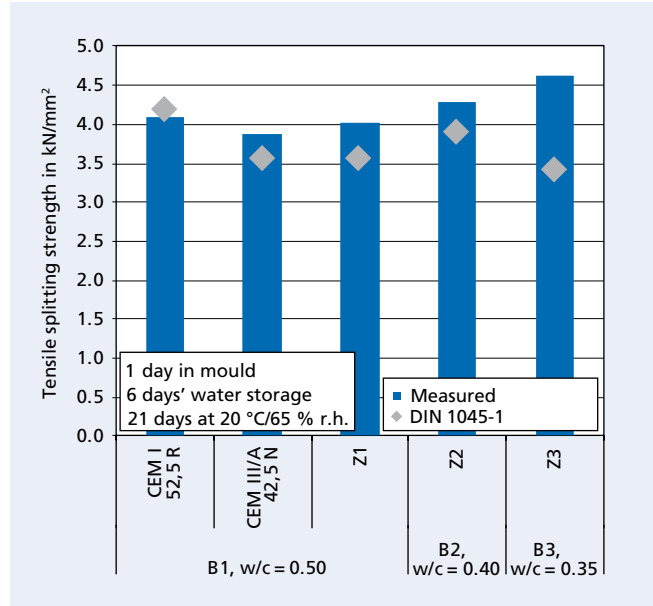


Bild 10: Darstellung der Spaltzugfestigkeit
Figure 10: Tensile splitting strength

2.3.7 Kriechen und Schwinden

Die Schwind- und Kriechmessungen an Zylindern mit den Abmessungen $\varnothing = 158 \text{ mm}$, $h = 300 \text{ mm}$ wurden gemäß DAfStb-Heft 422, Abschnitt 2.6 an je zwei Zylindern durchgeführt. Die Probekörper wurden nach dem Betonieren einen Tag in der Schalung belassen, danach bis zum 7. Tag unter Wasser und anschließend bei einer Temperatur von $20 \text{ }^\circ\text{C}$ und einer relativen Luft-

The extent to which variation of the water content ($\Delta W = -10, 0, +10$ and $+20 \text{ l/m}^3$) affects compressive strength and resistance to carbonation was examined. The tests were performed on both concretes with two trial cements (B1 with cement Z1 and B3 with cement Z3) and on the reference concrete B1 with CEM III/A 42,5 N. All twelve concretes were set to a flow table spread of $500 \pm 20 \text{ mm}$ by way of corresponding superplasticizer dosing.

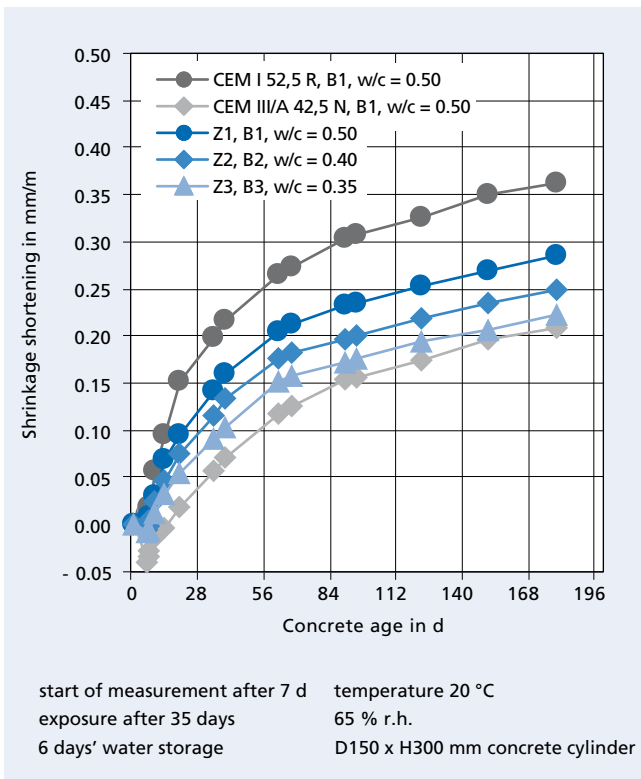


Bild 11: Verlauf der Schwindverformungen der Referenzbetone und der Betone mit klinkereffizienten Zementen
Figure 11: Behaviour pattern of the shrinkage deformation of the reference concretes and of the concretes made with clinker-efficient cements

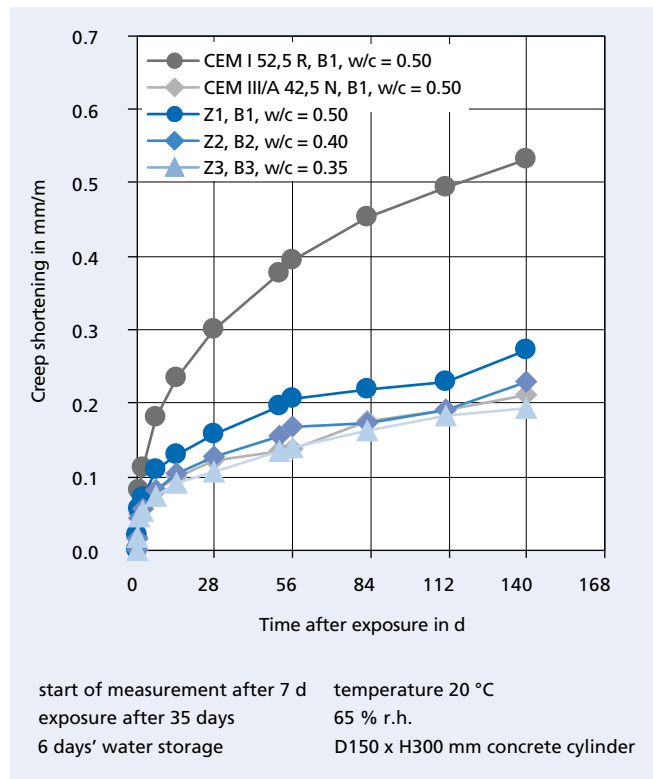


Bild 12: Kriechverformungen der Referenzbetone und der Betone mit klinkereffizienten Zementen
Figure 12: Creep deformation of the reference concretes and of the concretes made with clinker-efficient cements

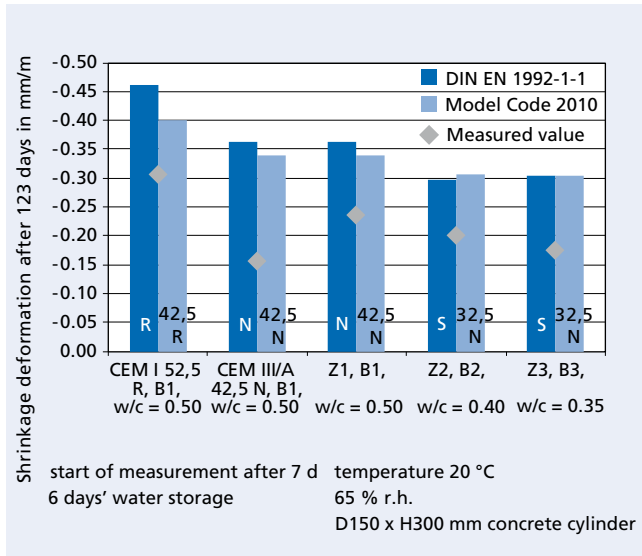


Bild 13: Vergleich der Messergebnisse zum Schwinden mit den Ansätzen nach Model Code 2010 und Eurocode 2
Figure 13: Comparison of the test results for shrinkage with the procedures specified in Model Code 2010 and Eurocode 2

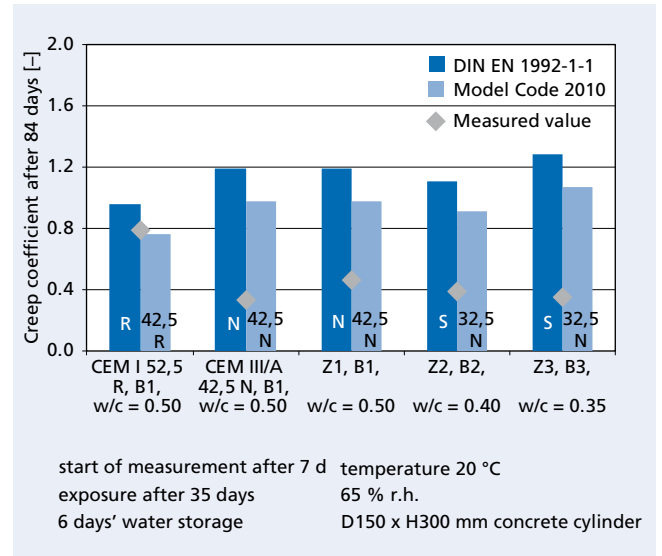


Bild 14: Vergleich der ermittelten Kriechzahl mit den Ansätzen nach Model Code 2010 und Eurocode 2
Figure 14: Comparison of the measured creep coefficient with the procedures specified in Model Code 2010 and Eurocode 2

feuchte von $(65 \pm 2) \%$ gelagert. Die Schwindmessungen wurden nach sechs Tagen Wasserlagerung bis zu einem Alter von 168 Tagen nach Auslagerung durchgeführt.

Die Kriechspannung von $\sigma_u = 1/3 f_{c,cyl}$ wurde im Alter von 28 Tagen aufgebracht. Die Kriechmessungen erfolgten bis zu einem Alter von 140 Tagen nach Belastung.

Die gemessenen Schwinddehnungsverläufe sind in Bild 11 dargestellt. Man erkennt zunächst ein gewisses Quellen des Betons mit Hochofenzement während der Wasserlagerung. Bei einem Wasserzementwert $w/z = 0,50$ liegen die Dehnungen des Betons mit Z1 „mittig“ in dem durch die Betone mit den Referenzzementen CEM I und CEM III/A „aufgespannten“ Wertebereich. Die Schwinddehnungen der Betone mit den verringerten Wasserzementwerten und den Zementen Z2 und Z3 ordnen sich zwischen CEM I und CEM III/A mit $w/z = 0,50$ ein.

Die gemessenen Kriechdehnungsverläufe sind in Bild 12 dargestellt. Es handelt sich um die reinen Kriechverkürzungen – elastische Verkürzungen und Schwindverkürzungen sind nicht enthalten. Die Verkürzungen beziehen sich auf die Erstmessung unmittelbar nach dem Belastungsbeginn. Die Kriechverkürzungen der Betone mit Zementen mit mehreren Hauptbestandteilen sind durchweg geringer als die Kriechverkürzung des Betons mit dem Portlandzement CEM I. Bei gleichem Wasserzementwert $w/z = 0,50$ liegt die Kriechverkürzung des Betons mit Z1 im Bereich der Werte des Betons mit CEM III/A. Beide Zemente weisen einen vergleichbaren Klinkergehalt von rd. 50 M.-% auf.

Ein Vergleich der Messwerte mit den rechnerischen Schwindverformungen und Kriechzahlen der untersuchten Betone (s. Bilder 13 und 14) zeigt, dass die gemessenen Schwindverformungen und Kriechzahlen aller Betone deutlich geringer sind als nach Eurocode 2 und Model Code 2010.

2.3.8 Robustheit

„Robuste, baustellengerechte Betoneigenschaften“ ist zur Zeit eines der beherrschenden Themen in der Weiterentwicklung des Regelwerks für die Betonbauweise. Im Rahmen dieses Projektes wurde der Einfluss praxisrelevanter Wassergehaltsschwankungen auf ausgewählte Festbetoneigenschaften überprüft.

Es wurde untersucht, inwieweit sich die Variation des Wassergehalts ($\Delta W = -10, 0, +10$ und $+20 \text{ l/m}^3$) auf die Druckfestigkeit und den Carbonatisierungswiderstand auswirkt. Die Versuche wurden sowohl an Betonen mit zwei Versuchszementen (B1 mit Zement Z1 und B3 mit Zement Z3) als auch am Referenzbeton

The influence on compressive strength was investigated by testing the 2 and 28-day compressive strength on cubes with 150 mm edge length. The effect on resistance to carbonation was quantified by measuring the carbonation depth (storage at 20 °C, 65 % rel. humidity and increased CO₂ concentration of 2 vol. %).

Figs. 15 and 16 show the absolute values, Figs. 17 and 18 the results referenced to concrete with $\Delta W = 0$. The compressive strength of the concretes with the trial cements reacts more sensitively to the change in water content than the compressive strength of the reference concrete with CEM III/A. The dosing of water therefore calls for appropriate caution in practice. The change in the relative carbonation depth when using the trial cements is comparable to the extent found with use of a CEM III/A.

3 Life cycle assessment

3.1 General

The environmental impact of the cements and concretes investigated in the research project is calculated and presented in the form of graphs in the following. For calculation purposes, recourse was made to the GaBi 5 software basic data of the life cycle cost network and the EPD for average German cement (VDZ) [7]. No consideration was given to transportation from the plant to the purchaser with regard to assessment of the cements and concretes.

3.2 Environmental impact assessment

The applicable performance (compressive strength and durability) was taken into account when assessing the environmental impact of the concretes. Concretes with trial cements were compared to reference concretes and a concrete using cement with a high limestone content (CEM 50 % LL) studied in the preceding research project [1, 2]. Figs. 19 and 20 show the results of life cycle assessment for the concretes with comparable performance in terms of compressive strength and carbonation rate. The 28-day compressive strengths of the concretes investigated are $(65 \pm 10) \text{ N/mm}^2$.

Results comparable to those of the reference concretes with regard to resistance to chloride penetration were obtained for the concretes B1 with cement Z1, B2 with cement Z2 and B3 with cement Z3. The concrete B3 with CEM 50 % LL from [1, 2] had a far higher chloride migration coefficient.

B1 mit CEM III/A 42,5 N durchgeführt. Alle zwölf Betone wurden durch eine entsprechende Fließmitteldosierung auf ein Ausbreitmaß von 500 ± 20 mm eingestellt.

Der Einfluss auf die Druckfestigkeit wurde durch die Prüfung der 2- und 28-Tage-Druckfestigkeit an Würfeln mit 150 mm Kantenlänge untersucht. Der Einfluss auf die Dauerhaftigkeit gegenüber Carbonatisierung wurde durch die Messung der Carbonatisierungstiefe (Lagerung bei 20 °C, rel. Feuchte von 65 % und erhöhter CO₂-Konzentration von 2 Vol.-%) quantifiziert.

Die Bilder 15 und 16 zeigen die absoluten Werte, die Bilder 17 und 18 die auf Beton mit $\Delta W = 0$ bezogenen Ergebnisse. Die Druckfestigkeit der Betone mit den Versuchszementen reagiert

The greenhouse potential associated with the concrete B1 with cement C1 is approx. 35 % lower than for a theoretical concrete using EPD average cement. Greater savings of up to 40 % and 55 % can be achieved by employing the concretes B2 with cement Z2 and B3 with cement Z3.

A limiting factor in terms of the energy demand as compared to the concrete with EPD average cement was the greater fineness of the trial cements..

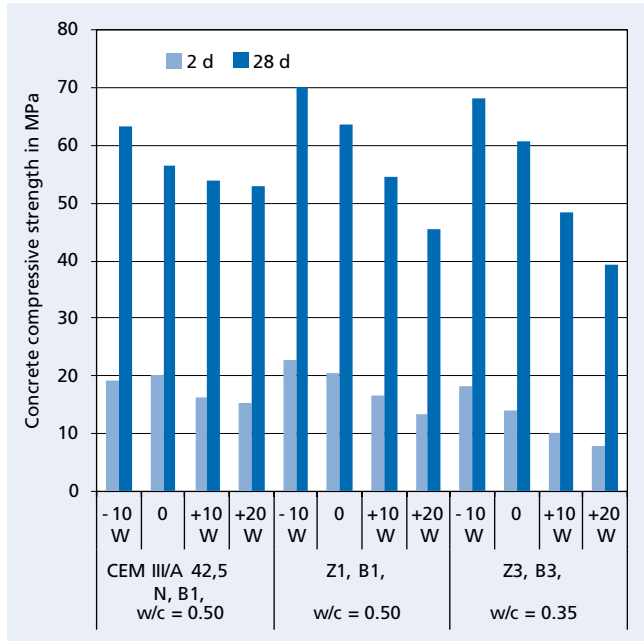


Bild 15: Druckfestigkeit in Abhängigkeit von dem Wassergehalt
Figure 15: Compressive strength in relation to water content

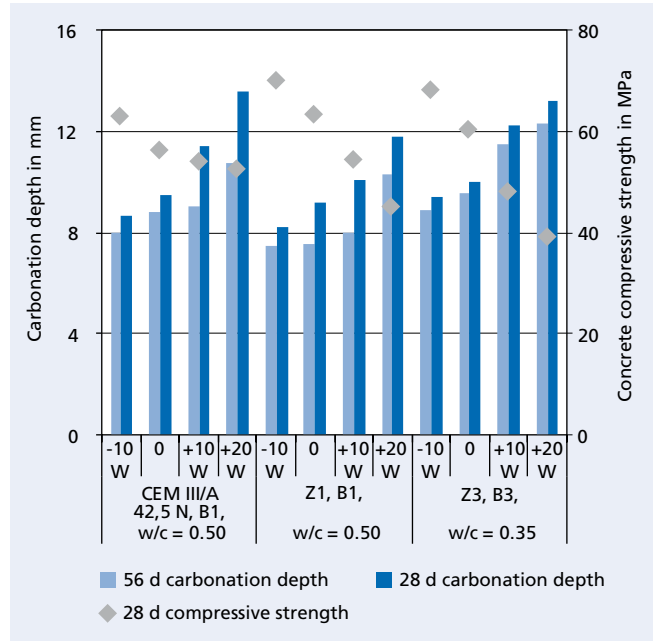


Bild 16: Carbonatisierungstiefe in Abhängigkeit von dem Wassergehalt
Figure 16: Depth of carbonation in relation to water content

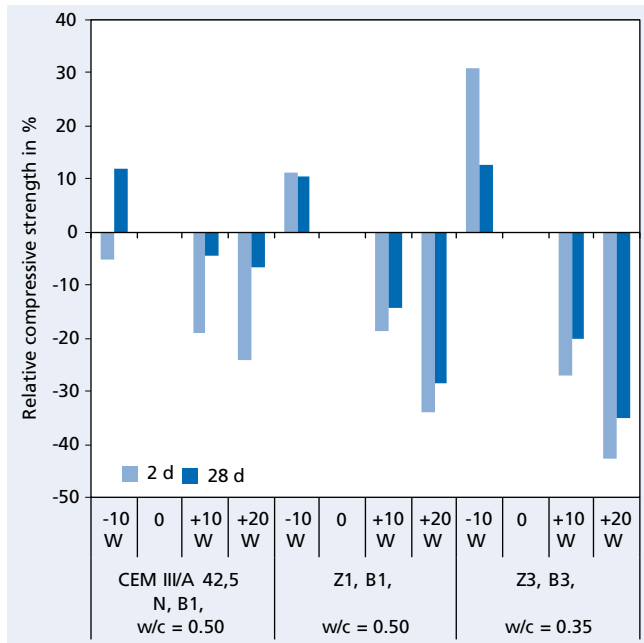


Bild 17: Druckfestigkeit in Abhängigkeit vom Wassergehalt, bezogen auf $\Delta W = 0$
Figure 17: Compressive strength in relation to water content, relative to $\Delta W = 0$

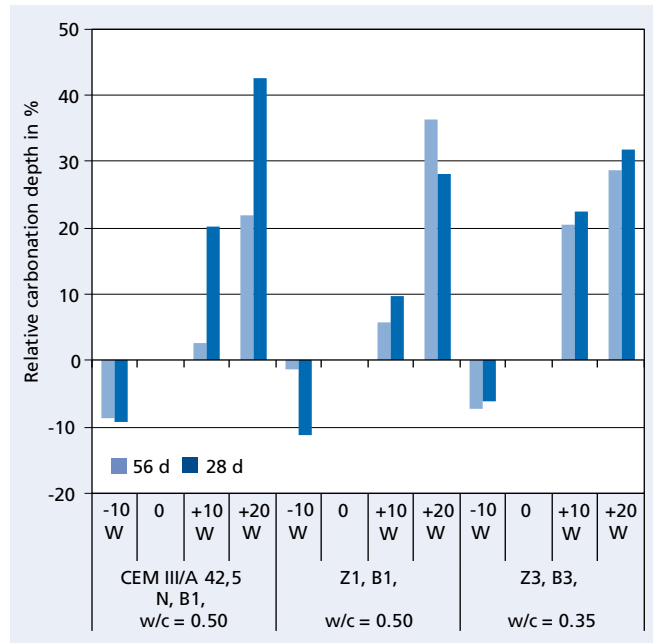


Bild 18: Carbonatisierungstiefe in Abhängigkeit vom Wassergehalt, bezogen auf $\Delta W = 0$
Figure 18: Depth of carbonation in relation to water content, relative to $\Delta W = 0$

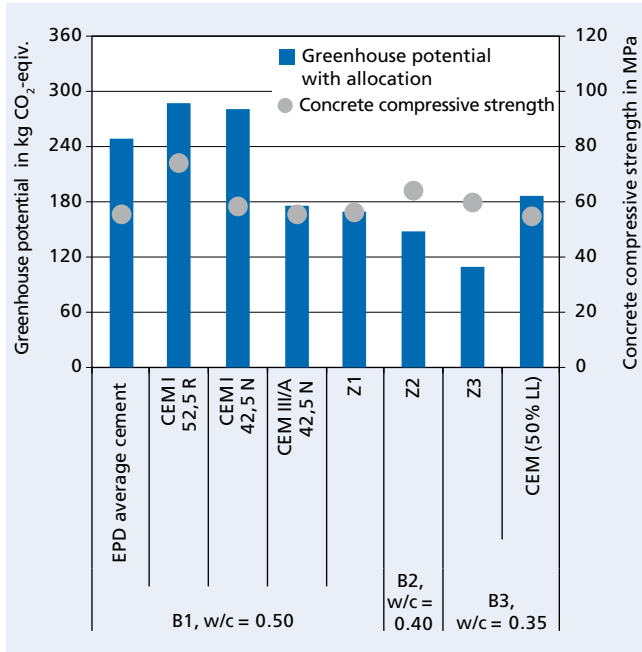


Bild 19: Treibhauspotenzial der untersuchten Betone aus Werkszementen
Figure 19: Greenhouse potential of the concretes under investigation made with factory cements

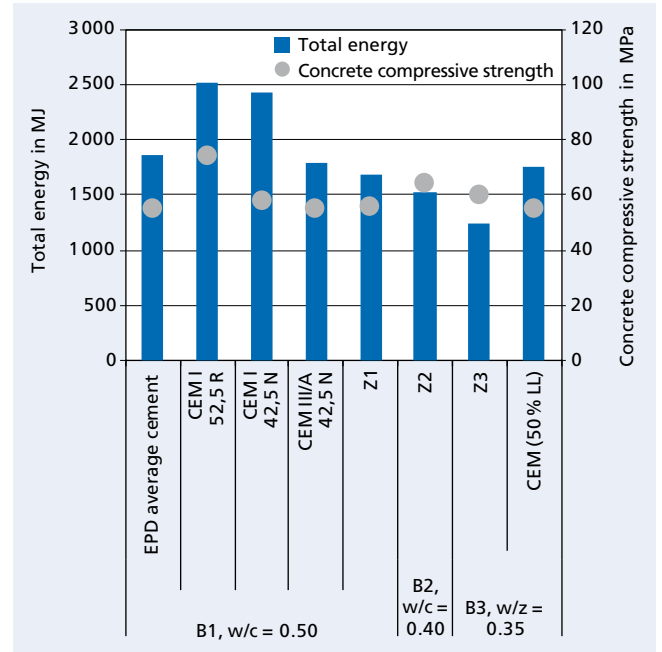


Bild 20: Gesamtenergiebedarf der untersuchten Betone aus Werkszementen
Figure 20: Total energy consumption of the concretes under investigation made with factory cements

sensibler auf die Änderung des Wassergehaltes als die Druckfestigkeit des Referenzbetons mit CEM III/A. In der Praxis ist daher entsprechende Sorgfalt bei der Wasserdosierung geboten. Die relative Carbonatisierungstiefe verändert sich bei Verwendung der Versuchszemente in vergleichbarem Ausmaß wie bei Verwendung eines CEM III/A.

3 Ökobilanzierung
3.1 Allgemein

Nachfolgend werden die Umweltwirkungen der im Forschungsprojekt untersuchten Zemente und Betone berechnet und grafisch dargestellt. Für die Berechnungen wurde auf die Basisdaten der Software GaBi 5 des Netzwerks Lebenszykluskosten und die EPD für den deutschen Durchschnittszement (VDZ) zugegriffen [7]. Für die Bewertung der Zemente und Betone wurden die Transportwege vom Werk zum Abnehmer vernachlässigt.

3.2 Bilanzierung der Betone

Bei Bilanzierung der Umweltwirkung der Betone wurde die jeweilige Leistungsfähigkeit (Druckfestigkeit und Dauerhaftigkeit) berücksichtigt. Betone mit Versuchszementen wurden mit Referenzbetonen sowie einem im vorangegangenen Forschungsvorhaben [1, 2] untersuchten Beton mit kalksteinreichem Zement (CEM 50 % LL) verglichen. In den Bildern 19 und 20 sind die Ergebnisse zur Ökobilanzierung der Betone mit vergleichbarer Leistungsfähigkeit bezüglich Druckfestigkeit und Carbonatisierungsgeschwindigkeit dargestellt. Die 28 Tage Betondruckfestigkeiten der betrachteten Betone betragen 65 ± 10 N/mm².

Vergleichbare Ergebnisse gegenüber den Referenzbetonen hinsichtlich ihres Chlorideindringwiderstands zeigten die Betone B1 mit Zement Z1, B2 mit Zement Z2 und B3 mit Zement Z3. Der Beton B3 mit CEM 50 % LL aus [1, 2] hatte einen deutlich höheren Chloridmigrationskoeffizienten.

Im Vergleich zu einem Beton unter gedanklicher Verwendung des EPD-Durchschnittszements ergibt sich eine Minderung des Treibhauspotenzials von ca. 35 % bei Verwendung des Betons B1 mit Zement Z1. Größere Einsparungen bis zu 40 % und 55 % können bei der Verwendung der Betone B2 mit Zement Z2 und B3 mit Zement Z3 erreicht werden.

4 Summary

The tests have shown that cements containing Portland cement clinker, granulated blastfurnace slag and limestone as the main constituents taken from the area shown in Fig. 1 with a clinker content of about 50 mass % are suitable, in principle, for producing structural concretes.

Cements in the transition region to the currently envisaged extension of DIN EN 197-1 are of particular interest. These cements give fresh concrete properties as used in practice, good mechanical properties and, with the exception of freeze-thaw resistance, very good durability properties that lie within the framework of the currently valid descriptive rules of DIN 1045-2. A precondition is chemical and mineral optimization as well as granulometric optimization of the cements. There is potential for optimization with respect to the freeze-thaw resistance.

For cements that lie outside the range of the currently envisaged extension of DIN EN 197-1 the findings of the previous cement research project into cements containing high levels of limestone [1, 2] apply in principle. Cements with Portland cement clinker, granulated blastfurnace slag and limestone as the main constituents and with clinker contents of, for example, 35 or 20 mass %, are also suitable for producing structural concretes provided not only granulometric matching of the main constituents but also exacting concrete technology measures (low-water concrete with low water/cement ratio and corresponding addition levels of admixtures) are applied. The robustness of these concretes during construction work requires further verification. If these conditions are met then the limit of 50 mass % clinker in the cement defined in the previous research project can, where appropriate, be lowered further. This would also optimize the global warming potential and the total energy consumption for producing a cubic metre of concrete still further (see Figs. 19 and 20).

Begrenzender Faktor bezüglich des Energiebedarfs im Vergleich zum Beton mit EPD-Durchschnittszement war die erhöhte Mahlfeinheit der Versuchszemente.

4 Zusammenfassung

Die Versuche haben gezeigt, dass sich Zemente mit den Hauptbestandteilen Portlandzementklinker, Hüttensand und Kalkstein aus dem in Bild 1 gezeigten Bereich mit einem Klinkergehalt von rd. 50 M.-% prinzipiell zur Herstellung von Konstruktionsbetonen eignen.

Zemente im Übergangsbereich zu der derzeit vorgesehenen Erweiterung der DIN EN 197-1 sind dabei von besonderem Interesse: Diese Zemente führen zu praxismgerechten Frischbetoneigenschaften, guten mechanischen Eigenschaften und, mit Ausnahme des Frost-Widerstandes, zu sehr guten Dauerhaftigkeitseigenschaften bereits im Rahmen der heute gültigen deskriptiven Regeln der DIN 1045-2. Voraussetzung ist die chemisch-mineralogische sowie granulometrische Optimierung der Zemente. Optimierungspotenzial besteht bzgl. des Frost-Widerstands.

Für Zemente jenseits des Bereichs der derzeit vorgesehenen Erweiterung der DIN EN 197-1 gelten prinzipiell die Erkenntnisse des vorangegangenen Forschungsvorhabens zu kalksteinhaltigen Zementen mit hohen Kalksteingehalten [1, 2]. Zemente mit den Hauptbestandteilen Portlandzementklinker, Hüttensand und Kalkstein mit Klinkergehalten von z.B. 35 bzw. 20 M.-% sind ebenfalls für die Herstellung von Konstruktionsbeton geeignet, wenn neben einer granulometrischen Abstimmung der Hauptbestandteile anspruchsvolle betontechnologische Maßnahmen (wasserarmer Beton mit niedrigem Wassermengefaktor und entsprechenden Zusatzmitteldosierungen) zur Anwendung kommen. Die Robustheit derartiger Betone im Baubetrieb bedarf einer weiteren Absicherung. Werden die genannten Bedingungen eingehalten, kann die im vorangegangenen Forschungsvorhaben definierte Grenze von 50 M.-% Klinker im Zement ggf. weiter gesenkt werden. Damit würden auch das Treibhauspotenzial sowie der Gesamtenergiebedarf für Herstellung eines Kubikmeters Beton weiter optimiert (vgl. Bilder 19 und 20).

5 Weitere Ergebnisse

Weitere Untersuchungen, beispielsweise bzgl. Frost-Tausalz-Widerstand, Traglastversuche oder Robustheit der Betone bzgl. Temperaturschwankungen, wurden durchgeführt. Der Abschlussbericht kann auf www.vdz-online.de abgerufen werden.

Danksagung

Der Dank der Autoren gilt der Deutschen Bundesstiftung Umwelt e.V. (DBU) für die Förderung des Projektes.

5 Further results

Further investigations, for example with respect to resistance to freeze-thaw with de-icing salt, bearing capacity tests and robustness of the concretes with regard to temperature fluctuations, have been carried out. The final report can be accessed at www.vdz-online.de.

Acknowledgement

The authors would like to thank the DBU (German Foundation for the Environment) for sponsoring the project.

Literatur / Literature

- [1] Müller, Ch.; Palm, S.; Graubner, C.-A.; Proske, T.; Hainer, S.; Rezvani, M.; Neufert, W.; Reuken, I.: Zemente mit hohen Kalksteingehalten – Dauerhaftigkeit und praktische Umsetzbarkeit. *beton* 64 (2014) H. 1+2, S. 43–50
- [2] Palm, S.; Proske, T.; Rezvani, M.; Hainer, S.; Müller, Ch.; Graubner, C.-A.: Cements with a high limestone content – Mechanical properties, durability and ecological characteristics of the concrete. *Construction and Building Materials* (2016), S. 308–318
- [3] 2013. CEN/TR 16563:2013: Principles of the equivalent durability procedure (Verfahrensgrundsätze zum Nachweis gleichwertiger Dauerhaftigkeit)
- [4] Tang, L.: Chloride Transport in Concrete – Measurement and Prediction. Dissertation, Chalmers University of Technology, Göteborg 1996
- [5] BAW-Merkblatt „Chlorideindringwiderstand“. Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe 2004
- [6] BAW-Merkblatt „Chlorideindringwiderstand“. Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe 2012
- [7] Umweltproduktdeklaration des Vereins Deutscher Zementwerke e.V. Zement. Verein Deutscher Zementwerke e.V., Institut Bauen und Umwelt e.V., Düsseldorf, März 2012

