

Christoph Müller, Düsseldorf

# Aktuelle Regelwerke für Beton

## Current regulations for concrete

### Übersicht

Die Dauerhaftigkeit ist ein maßgebliches Qualitätsmerkmal von Betonbauteilen und eine wesentliche – auch ökologische – Grundanforderung an Bauwerke. Die technische Weiterentwicklung des Baustoffs bei gleichzeitiger Berücksichtigung umweltpolitischer und wirtschaftlicher Randbedingungen macht Betone heute zu komplexen Systemen verschiedener Betonausgangsstoffe, die sich in verschiedensten Umgebungsbedingungen bewähren müssen. Während das wesentliche Ziel der diesen Prozess begleitenden europäischen Normung die Beseitigung technischer Handelshemmnisse durch die Schaffung einheitlicher Produktnormen ist, definieren die Mitgliedstaaten die ihren klimatischen Bedingungen, ihren Bautraditionen, den rohstoffbedingten Möglichkeiten und ihren Sicherheitsbedürfnissen angemessenen Anwendungsregeln. Die europäische Betonnorm EN 206 mit den diversen nationalen Anwendungsregeln ist – obwohl keine harmonisierte technische Spezifikation im Sinne der Bauproduktenverordnung – ein Beispiel für dieses System. Die Dauerhaftigkeit von Betonbauwerken wird dabei üblicherweise durch deskriptive Regeln an die Betonzusammensetzung sowie Anforderungen an die Betondeckung und die Nachbehandlung sichergestellt. Diese sind entsprechend den jeweiligen konkreten Bauteilbedingungen und bautechnischen Erfordernissen anzuwenden. Die sachgerechte Umsetzung der deskriptiven Anforderungen ist die Aufgabe erfahrener Betoningenieure. Darüber hinaus besteht für besondere Anwendungsbereiche die Möglichkeit, die Dauerhaftigkeit des Betons in Laborprüfungen (Labor-Performance) nachzuweisen oder rechnerisch zu prognostizieren.

### 1 Einleitung

„Bauprodukte und Bauarten dürfen nur verwendet werden, wenn bei ihrer Verwendung die baulichen Anlagen bei ordnungsgemäßer Instandhaltung während einer dem Zweck entsprechenden angemessenen Zeitdauer die Anforderungen dieses Gesetzes oder aufgrund dieses Gesetzes erfüllen und gebrauchstauglich sind“ [1]. Diese der Musterbauordnung entnommene Formulierung ist seit jeher Grundlage zur Ableitung entsprechender Regelwerke zur Errichtung dauerhafter Bauwerke. Mit der neuen Grundanforderung an Bauwerke Nr. 7 [2] unterstreicht nun auch die Bauproduktenverordnung die Dauerhaftigkeit als wesentliche Grundanforderung an nachhaltige Bauwerke, ohne dass sich daraus unmittelbar zusätzliche Anforderungen an Bauprodukte ergeben müssen [3].

Die Dauerhaftigkeit von Betonbauwerken wird üblicherweise durch deskriptive Regeln an die Betonzusammensetzung (Anforderungen an Ausgangsstoffe, maximaler (äquivalenter) Wasserzementwert, Mindestzementgehalt etc.), Anforderungen an die Betondeckung und die Nachbehandlung sowie die sachgerechte Umsetzung ggf. weiterer Erfordernisse aus bautechnischen Randbedingungen (z.B. Gleitbau etc.) sichergestellt. Dieses Prinzip hat sich in weiten Teilen des Bauens mit Beton bewährt und wird auch mit der aktuellen Überarbeitung der europäischen Betonnorm EN 206 nicht aufgegeben. Alternative Nachweise – so genannte leistungsbezogene Entwurfsverfahren – wurden gleichzeitig im Zuge der Vorbereitung der Revision intensiv diskutiert. Auch wenn in der aktuellen Überarbeitung der EN 206 noch keine unmittelbar anwendbaren Regeln hierfür aufgestellt werden, können Labor-Performance-Prüfverfahren heute bereits auf nationaler Ebene zielgerichtet eingesetzt werden. Ein Beispiel ist das

### Abstract

Durability is an essential quality feature of concrete components and a basic (as well as ecological) requirement for construction works. The onward technical development of the construction material while at the same time taking environmental policy and economic constraints into account has now turned concrete into a complex system of different concrete constituents that has to prove successful under widely varying ambient conditions. The main aim of the European standardization that accompanies this process is to eliminate technical barriers to trade by creating uniform product standards although the member states define the application rules appropriate to their climatic conditions, their building traditions, the available raw materials and their safety requirements. Although it is not a harmonized technical specification acc. to the Construction Products Regulation the European concrete standard EN 206 with the diverse national application documents is an example of this system. The durability of concrete structures is normally ensured by descriptive rules for the concrete composition and requirements for the concrete cover and the curing. These have to be applied in accordance with the exposure conditions and the structural requirements. Correct implementation of the descriptive requirements is the task of experienced concrete engineers. In addition to this there is the option for special applications of demonstrating the durability of the concrete in laboratory tests (laboratory performance) or predicting it by service life design.

### 1 Introduction

“Construction products and types of construction may only be used if, during their use, the structures fulfil the requirements of this law or based on this law and are fit for purpose with adequate maintenance during a time period appropriate to the objective” [1]. This formulation taken from the Model Building Regulation has for a long time been the basis for drawing up the appropriate regulations for constructing durable structures. With the new Basic Requirement for construction works No. 7 [2] the Construction Product Regulation now also emphasizes durability as an essential basic requirement for sustainable construction works without necessarily giving rise directly to additional requirements for construction products [3].

The durability of concrete structures is normally ensured by descriptive rules for the concrete composition (requirements for constituents, maximum (equivalent) water/cement ratio, minimum cement content, etc.), requirements for the concrete cover and the curing, and correct implementation of other possible requirements from structural engineering conditions (e.g. slipform construction). This principle has proved successful in wide areas of construction with concrete and will not be abandoned in the current revision of the EN 206. During the preparation of the revision there has also been intensive discussion of alternative methods of proof – so-called performance-related design methods. Even though no directly applicable rules will be drawn up for this in the current revision of EN 206 laboratory performance test methods can already be used constructively at the national level. One example of this is the concept of equivalent concrete performance practiced in the Netherlands. In Germany, proof of the durability of concrete based on laboratory tests is used in, for example, the course of technical approvals (abZ-AZ) for cements or in ASR performance tests. The course of damage of the concrete by an alkali-silica reaction (ASR)

in den Niederlanden praktizierte Konzept der gleichen Betonleistungsfähigkeit. In Deutschland werden Nachweise der Dauerhaftigkeit von Beton anhand von Labor-Prüfungen z.B. im Zuge allgemeiner bauaufsichtlicher Anwendungszulassungen (abZ-AZ) für Zemente oder bei AKR-Performance-Prüfungen eingesetzt. In der AKR-Performance-Prüfung an Betonen für den Bau von Fahrbahndecken oder Flugbetriebsflächen wird der Schädigungsverlauf des Betons durch eine Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR) überprüft. Hierdurch soll sichergestellt werden, dass die Gebrauchstauglichkeit der Betonfahrbahndecke/Flugbetriebsfläche bzw. die Verkehrssicherheit seiner Nutzer nicht durch eine AKR gefährdet wird.

## 2 Revision der EN 206-1

### 2.1 Allgemeines

Zum Zeitpunkt der Veröffentlichung dieses Beitrags im Frühjahr 2012 befindet sich der Entwurf der EN 206 im so genannten CEN-Enquiry. Im Rahmen dieser Umfrage sind die CEN-Mitgliedsstaaten aufgefordert anzugeben, ob der Normentwurf in der späteren Abstimmung (Formal vote) für sie zustimmungsfähig wäre bzw. was für die Zustimmung des betreffenden Landes verändert werden müsste. Daher wird hier aus einer Reihe bisher nicht veröffentlichter CEN-Dokumente zitiert werden müssen und folgerichtig kann noch nicht über die endgültige Fassung der Norm berichtet werden. Einige grundlegende Punkte, die mit großer Wahrscheinlichkeit Eingang in die Norm finden werden, werden nachfolgend beispielhaft erläutert. Basis sind u.a. das Dokument [4], d.h. der sich im Enquiry befindende Normentwurf. In die Norm integriert werden soll gemäß vorliegendem Entwurf der bisherige Teil 9 (Selbstverdichtender Beton), sodass die zusätzliche Ziffer „1“ in der Bezeichnung der EN 206 entfallen wird. Neu aufgenommen wurden u.a. eine Tabelle zu Grundanforderungen an die Gesteinskörnung und ein Verweis auf den technischen Bericht zur Vermeidung einer schädigenden Alkali-Kieselsäure-Reaktion. Weiterhin findet eine Überarbeitung und Ergänzung der Anhänge statt. Beispielhaft seien hier genannt die Anhänge D (Zusätzliche Anforderungen an Beton für besondere Aufgaben des Grundbaus), E (Verwendung grober rezyklierter Gesteinskörnung), F (Grenzwerte der Betonzusammensetzung), G (Selbstverdichtender Beton), H (Anwendung der Methode C, „control charts“) und J (Spanische Sonderregelung für den Konformitätsnachweis).

### 2.2 Verwendung von Zementen

Im Abschnitt 5.1.2 der EN 206 wird die generelle Eignung von Zementen nach EN 197-1 (Normalzemente) zur Herstellung von Beton nach EN 206 festgestellt. Darüber hinaus können je nach Anwendungsanforderungen (z.B. Expositionsklasse, Bauteilabmessungen) auch die Zemente der EN 14216 (Sonderzement mit sehr niedriger Hydratationswärme) und der EN 15743 (Sulfathüttenzement) verwendet werden. EN 206 enthält keine weitergehenden konkreten, normativen Festlegungen zur Anwendung einzelner Zementarten. Gemäß 5.2.2 „Wahl des Zements“ muss der Zement „aus den Zementen ausgewählt werden, deren allgemeine Eignung nachgewiesen wurde, wobei Folgendes zu berücksichtigen ist:

- Ausführung der Arbeiten
- Endverwendung des Betons
- Nachbehandlungsbedingungen (z.B. Wärmebehandlung)
- Maße des Bauwerks (Wärmeentwicklung)
- Umgebungsbedingungen, denen das Bauwerk ausgesetzt wird
- mögliche Reaktivität der Gesteinskörnung gegenüber den Alkalien der Ausgangsstoffe.

Die im informativen Anhang F enthaltenen Empfehlungen für die Betonzusammensetzung werden nun voraussichtlich für CEM I und CEM II gelten. Damit würde zumindest ein Teil der bereits seit vielen Jahren mit den normativen Tabellen F.3.1 bis F.3.4 in Deutschland gelebten Praxis der Verwendung von Zementen mit mehreren Hauptbestandteilen – zum Teil sogar über die derzeit gültigen deutschen Regelungen hinaus – in Form einer Empfehlung auf europäischer Ebene – umgesetzt. Konkret werden mit der Überarbeitung der EN 206 und der dann notwendigen Anglei-

is checked in the ASR performance test on concretes for the construction of concrete roads or airfields. This is intended to ensure that the fitness for use of the concrete roads or airfields and the safety of the traffic users is not put at risk by an ASR.

## 2 Revision of EN 206-1

### 2.1 General

At the time of publication of this contribution in early 2012 the draft of EN 206 was at the CEN enquiry stage. The CEN member countries are required in this survey to indicate whether they would be in agreement with the draft standard in the subsequent formal vote or what would have to be changed to achieve the agreement of the particular country. As a result it is necessary to quote a number of CEN documents that have not yet been published, so it is not yet possible to give a report on the final version of the standard. Some fundamental points that will very probably be included in the standard are explained below by way of example. They are based on, among others, the document [4], i.e. the draft standard used in the enquiry. According to the present draft the former Part 9 (Self-compacting concrete) is to be integrated into the standard with the result that the additional digit “1” in the designation of EN 206 will be omitted. A table of the basic requirements for the aggregate and a reference to the technical report on avoiding harmful alkali-silica reactions have, among others, been newly included. The appendices are also being revised and enlarged. These include Appendices D (Additional requirements for concrete for special geotechnical works), E (Use of coarse recycled aggregate), F (limits of the concrete composition), G (Self compacting concrete), H (Application of method C, “control charts”) and J (Special Spanish regulation for proof of conformity).

### 2.2 Use of cements

The general suitability of cements complying with EN 197-1 (normal cements) for producing concrete complying with EN 206 is established in Section 5.1.2 of EN 206. Depending on the application (e.g. exposure class, component dimensions) it is also possible to use cements complying with EN 14216 (Special cement with very low heat of hydration) and EN 15743 (Supersulfated cement). EN 206 does not contain any advanced specific normative definitions about the use of individual types of cement. According to 5.2.2 “Selection of cement” the cement must be selected from those cements that have been shown to be generally suitable, for which the following must be taken into account:

- execution of the work
- intended use of concrete
- curing conditions (e.g. heat treatment)
- dimensions of the structure (the heat development)
- environmental conditions to which the structure is to be exposed
- potential reactivity of the aggregate to the alkalis from the constituents.

The recommendations for the concrete composition contained in the informative Appendix F will now presumably apply to CEM I and CEM II cements. This would implement at least part of the practice already employed for many years in Germany with the normative tables F.3.1 to F.3.4 of using cements with several main constituents – sometimes even beyond the currently valid German regulations – in the form of a recommendation at the European level. With the revision of EN 206 and the adjustment of DIN 1045-2 that will then be necessary the areas of application for cements will also in future be laid down precisely at the national level in Appendix F of DIN 1045-2.

### 2.3 Use of concrete additions

In the CEN member countries additions are used in concrete within the framework of different principles or concepts. Working group (TG) 5 of the CEN/TC 104/SC1 has summarized the principles and concepts in a report that will be published as a CEN Technical Report (CEN/TR) [7]. A precondition for application of the principles and concepts is conformity of the concrete addition

Tafel 1: Vorschlag für das k-Wert-Konzept der EN 206 gemäß [4]  
 Table 1: Proposal for the k-value concept for EN 206 in accordance with [4]

Betonzusatzstoff Concrete addition	Zulässige Zementarten nach EN 197-1 (z) / Permissible types of cement acc. to EN 197-1 (c)	k-Wert k-value	Zusatzmenge, die auf $(w/z)_{eq}$ angerechnet werden darf Amount of addition that can be counted towards the $(w/c)_{eq}$
Flugasche (f) nach EN 450-1 fly ash (f) acc. to EN 450-1	CEM I	0,4 <sup>1)</sup>	$f/z \leq 0,33$
	CEM II/A		$f/z \leq 0,25$
Silikastaub (s) nach EN 13263-1 silica fume (s) acc. to EN 13263-1	CEM I und / and CEM II/A (ohne / without CEM III/A-D)	2,0 <sup>1)</sup> für $(w/z)_{eq} \leq 0,45$ 2,0 <sup>1)</sup> für $(w/z)_{eq} > 0,45$ , außer für XC und XF, in denen $k_s = 1,0$ gilt 2,0 <sup>1)</sup> for $(w/c)_{eq} \leq 0,45$ 2,0 <sup>1)</sup> for $(w/c)_{eq} > 0,45$ except for XC and XF where $k_s = 1,0$	$s/z \leq 0,11$
Hüttensandmehl (h) nach EN 15167-1 blastfurnace slag meal (h) acc. to EN 15167-1	CEM I und/ and CEM II/A	0,6 <sup>2)</sup>	$h/z \leq 1,0$

<sup>1)</sup> normativ / normative

<sup>2)</sup> empfohlener Wert / recommended value

chung der DIN 1045-2 auch zukünftig die Anwendungsbereiche für Zemente national im Anhang F der DIN 1045-2 festgelegt.

### 2.3 Verwendung von Betonzusatzstoffen

Die Verwendung von Betonzusatzstoffen im Beton erfolgt in den CEN-Mitgliedsstaaten im Rahmen unterschiedlicher Prinzipien bzw. Konzepte. Die Arbeitsgruppe (TG) 5 des CEN/TC 104/SC1 hat die Prinzipien und Konzepte in einem Bericht zusammengestellt, der als CEN Technical Report (CEN/TR) [7] veröffentlicht wird. Voraussetzung zur Anwendung der Prinzipien und Konzepte ist die Konformität des Betonzusatzstoffs mit einer der in Tafel 1 aufgeführten europäisch harmonisierten Stoffnormen.

#### 2.3.1 k-Wert-Konzept

Das k-Wert-Konzept ermöglicht als deskriptive Regelung – d.h. ohne weitere Prüfungen neben dem Konformitätsnachweis des Betons – die Anrechnung eines festgelegten Zusatzstoffgehalts auf den (äquivalenten) Wasserzementwert bzw. den Mindestzementgehalt.

Der vorliegende Entwurf der EN 206 sieht die in Tafel 1 angegebenen k-Werte zur Verwendung mit CEM I und CEM II/A vor.

#### 2.3.2 Prinzip „Beton gleicher Leistungsfähigkeit“

In Abschnitt 5.2.5.3 der EN 206 werden aller Voraussicht nach die Prinzipien des „equivalent concrete performance concept“ (ECPC) eingeführt. Dieses Konzept ermöglicht definierte Abweichungen von den national festgelegten deskriptiven Anforderungen an den maximalen Wasserzementwert und den Mindestzementgehalt bei gemeinsamer Verwendung eines Zements und eines Zusatzstoffs, deren Herkunft und Eigenschaften eindeutig beschrieben sind. Der Nachweis der vergleichbaren Leistungsfähigkeit erfolgt anhand von Dauerhaftigkeitsprüfungen am Beton mit der entsprechenden Materialkombination im Vergleich zu einem Referenzbeton für die entsprechende(n) Expositionsklasse(n). In den Niederlanden z.B. wurden Ablauf, Kriterien und Prüfverfahren des ECPC in der nationalen Leitlinie CUR-Empfehlung 48 [5] festgelegt. Das ECPC wird in den Niederlanden seit etwa 15 Jahren für die Verwendung von Flugasche und Zement (CEM I oder einer parallelen Verwendung von CEM I und CEM III) und seit etwa zehn Jahren für Hüttensandmehl und Zement verwendet. Die Verfahren und Anforderungen zur Anwendung von Flugasche bzw. von Hüttensandmehl und Flugasche werden in der niederländischen Beurteilungsrichtlinie für die Zertifizierung BRL 1802 [6] beschrieben [7].

to one of the product standards harmonized at the European level and listed in Table 1.

#### 2.3.1 k-value concept

As a descriptive regulation – i.e. without further tests other than proof of conformity of the concrete – the k-value concept allows a stated addition content to be counted towards the (equivalent) water/cement ratio or minimum cement content.

The present draft of EN 206 provides for k values given in Table 1 to be used with CEM I and CEM II/A cements.

#### 2.3.2 Principle of “equivalent concrete performance”

In all probability the principles of the “equivalent concrete performance concept” (ECPC) will be included in Section 5.2.5.3 of EN 206. This concept permits specific deviations from the descriptive requirements specified at the national level for the maximum water/cement ratio and the minimum cement content during joint use of a cement and an addition with clearly defined origin and properties. The proof of equivalent performance is obtained with the aid of durability tests on concrete with the appropriate material combination compared with a reference concrete for the corresponding exposure class(es). In the Netherlands, for example, the procedures, criteria and test methods for the ECPC are laid down in the national guideline CUR Recommendation 48 [5]. The ECPC has been used for about fifteen years in the Netherlands for the use of fly ash and cement (CEM I or a parallel use of CEM I and CEM III) and for about ten years for ground granulated blastfurnace slag and cement. The methods and requirements for using fly ash or ground granulated blastfurnace slag and fly ash are described [7] in the Netherlands assessment guidelines for the BRL 1802 certification [6].

#### 2.3.3 Principle of “Equivalent performance of cement/addition combinations”

The “Equivalent performance of combinations concept” (EPCC) lays down a procedure with which the basic requirements are established for using a combination of a certain cement (as a rule CEM I Portland cement) and a certain addition in the same way as a type of cement of comparable composition conforming to EN 197-1. In Great Britain and Ireland the concept includes compressive strength tests on mortars as defined in EN 196-1. In Portugal, however, the amount of the combination of a cement and addition that corresponds to a cement type conforming to EN 197-1, is determined mathematically for the combination. The respective application rules stipulated at the national level for this cement

### 2.3.3 Prinzip „Kombinationen Zement/Zusatzstoff gleicher Leistungsfähigkeit“

Im „equivalent performance of combinations concept“ (EPCC) wird ein Prozedere festgelegt, mit dem die Voraussetzungen geschaffen werden, eine Kombination eines bestimmten Zements (in der Regel Portlandzement CEM I) und eines bestimmten Zusatzstoffs so zu verwenden, wie eine vergleichbar zusammengesetzte Zementart nach EN 197-1. In Großbritannien und Irland beinhaltet das Konzept Druckfestigkeitsprüfungen an Mörteln nach EN 196-1, während in Portugal für die Kombination rechnerisch festgestellt wird, welcher Anteil der Kombination aus Zement und Zusatzstoff einer Zementart nach EN 197-1 entspricht, dessen jeweilige national festgelegte Anwendungsregel dann herangezogen wird. Damit unterscheidet sich das „equivalent performance of combinations concept“ (EPCC) grundlegend von dem „equivalent concrete performance concept“ (ECPC) dadurch, dass der Nachweis der Dauerhaftigkeit nicht durch Dauerhaftigkeitsprüfungen im konkreten Fall erbracht wird, sondern seine Begründung in den Praxiserfahrungen der Länder hat, in denen es im Rahmen der entsprechenden nationalen Anwendungsregeln (Betonzusammensetzung, Betondeckung und Nachbehandlung) sowie unter den entsprechenden klimatischen Bedingungen, der Bautradition und dem Sicherheitsbedürfnis verwendet wurde.

### 2.4 Verwendung von Gesteinskörnungen

Der aktuelle Normentwurf [4] enthält, ähnlich wie im deutschen DIN-Fachbericht 100 „Beton“, im Anhang U eine Tabelle mit „Mindestanforderungen“ an die Gesteinskörnungen, die als „generell geeignet“ für Beton nach EN 206 angesehen werden. Insbesondere die Vorschläge zu den Mindestanforderungen an die Kornform „FI<sub>40</sub>“ und an die Kornfestigkeit LA<sub>50</sub>“ (prEN 206, Tabelle 15) dürften noch zu diskutieren sein. Kommentare hierzu liegen aus einigen Ländern (u.a. Deutschland) und vom Europäischen Transportbetonverband ERMCO vor. Grundsätzlich besteht aber Einvernehmen im CEN/TC 104/SC1, dass „Mindestanforderungen“ notwendig sind, da die europäische Gesteinskörnungsnorm im Zuge ihrer Weiterentwicklung mittlerweile Gesteinskörnungen zulässt, deren generelle Eignung zur Herstellung von Beton nach EN 206 bisher nicht nachgewiesen ist bzw. im CEN/TC 104/SC1 angezweifelt wurde. Die zuständige Arbeitsgruppe (TG) 19 soll des Weiteren Mindestanforderungen an leichte Gesteinskörnungen nach EN 13055 erarbeiten.

### 2.5 Konformitätsnachweis

Die zuständige Arbeitsgruppe (TG) 10 hatte ihre Arbeit mit der Maßgabe aufgenommen, dass sich die Regeln für die Werkseigene Produktionskontrolle und den Konformitätsnachweis von Beton in der EN 206-1 vom Grundsatz her bewährt haben und es daher keine Notwendigkeit gibt, das System grundlegend zu verändern. Die folgenden Aspekte hat sich TG10 dennoch noch einmal genauer angesehen [8]:

- Mögliche Aufnahme einer Definition „Produktionstag“ und „Produktionswoche“
- Anzahl der Prüfergebnisse und Bewertungszeitraum
- Verwendung von Kontrollkarten als Alternative zum „klassischen“ Konformitätsnachweis
- Konformitätsnachweis und Identitätsprüfung für andere Parameter als die Druckfestigkeit
- Konformitätskriterien und werkseigene Produktionskontrolle für den Fasergehalt.

Der aktuelle Normentwurf [4] enthält u.a. die in Tafel 2 aufgeführten Vorschläge mit Bezug auf die zuvor genannten Aspekte.

Erwähnenswert ist weiterhin der neue informative Anhang J der EN 206, der es Spanien erlaubt, bei Methode B einen größeren Koeffizienten als 1,48 für den Konformitätsnachweis der Betondruckfestigkeit festzuschreiben. Konkret verwendet Spanien weiterhin den früher auch in Deutschland vorgeschriebenen Wert von 1,64. Der Grund dafür ist, dass gemäß einer notifizierten spanischen Regel das Abnehmerrisiko niemals mehr als 50 % betragen darf.

type are then applied. The “Equivalent performance of combinations concept” (EPCC) differs fundamentally from the “Equivalent concrete performance concept” (ECPC) in that the proof of durability is not provided in the specific case by durability testing but is based on the practical experience of the country in which it was used within the framework of the corresponding national application rules (concrete composition, concrete cover and curing) and under the corresponding climatic conditions, building traditions and safety requirements.

### 2.4 Use of aggregates

In a similar way to the German DIN Technical Report 100 “Concrete”, Appendix U of the current draft standard [4] contains a table of “minimum requirements” for the aggregates that are regarded as “generally suitable” for concrete conforming to EN 206. In particular, the proposals for the minimum requirements for the particle shape “FI<sub>40</sub>” and for the particle strength “LA<sub>50</sub>” (prEN 206, Table 15) still need to be discussed. There are comments on this from some countries (including Germany) and from ERMCO, the European Ready-mixed Concrete Organization. Basically, however, there is agreement in the CEN/TC 104/SC1 technical committee that “minimum requirements” are necessary because in the course of its onward development the European aggregates standard now permits aggregates with a general suitability for producing concrete conforming to EN 206 that has not yet been proved or about which the CEN/TC 104/SC1 has doubts. The relevant working group (TG) 19 is also to draw up minimum requirements for light-weight aggregates conforming to EN 13055.

### 2.5 Conformity control

The relevant working group (TG) 10 had started its work with the stipulation that the rules for factory production control and the conformity control of concrete in EN 206-1 have in principle proved successful and that there is therefore no need to make any fundamental changes to the system. In spite of this the TG10 has looked more closely again at the following aspects [8]:

- possible adoption of definitions for “production day” and “production week”
- number of test results and evaluation period
- use of control charts as an alternative to the “classical” conformity control
- conformity control and identity testing for parameters other than compressive strength
- conformity criteria and factory production controls for fibre content.

The current draft standard [4] contains, among other things, the recommendations listed in Table 2 with respect to the above-mentioned aspects.

Also worth mentioning is the new informative Appendix J of EN 206 that allows Spain to stipulate coefficients greater than 1.48 for the conformity control of the concrete compressive strength in Method B. In practice, Spain continues to use the value of 1.64 that earlier was also stipulated in Germany. The reason for this is that according to a notified Spanish rule the consumer’s risk must never be greater than 50 %.

### 3 Performance-related design methods (laboratory performance) using the example of the alkali-silica reaction (ASR)

The durability of concrete structures is normally ensured by descriptive rules for the concrete composition (requirements for constituents, maximum (equivalent) water/cement ratio, minimum cement content, etc.) and requirements for the concrete cover and curing. The performance of the concrete for new structures is therefore obtained from facts established from practical experience with existing structures.

The following three reasons, among others, can make it necessary to deviate from this procedure and prove the performance of the concrete and its potential in durability tests in the laboratory:

- a minimum service life >> 50 years has to be proved

Tafel 2: Änderungsvorschläge zum Thema „Konformitätsnachweis“ [4, 8]  
 Table 2: Proposed alterations to the topic of “conformity control” [4, 8]

Produktionstag <i>Production day</i>	Die Definition „Produktionstag“ wird nicht aufgenommen. Es konnte keine Einigkeit auf europäischer Ebene erzielt werden. Die Festlegung erfolgt wie bisher national. <i>The definition “production day” will not be included. No unanimity was obtained at the European level. The definition will be at the national level as before.</i>
Produktionswoche <i>Production week</i>	Der Begriff „Produktionswoche“ wurde ersetzt durch eine bestimmte Anzahl von Produktionstagen <i>The term “production week” has been replaced by a given number of production days</i>
Anzahl der Prüfergebnisse und Bewertungszeitraum <i>Number of test results and evaluation period</i>	EN 206-1 enthält bisher keine Begrenzung der Anzahl der Prüfergebnisse. Durch diese Unschärfe verwendet der Betonhersteller ggf. eine Standardabweichung, die nicht repräsentativ für den Nachweiszeitraum ist. <i>EN 206-1 had previously contained no limit to the number of test results. Due to this vagueness the concrete producers have sometimes used standard deviations that are not representative of the proof period.</i> Vorschlag für Werke mit geringer Prüfdichte / <i>Recommendation for plants with low testing frequency:</i> Anzahl Prüfergebnisse in drei Monaten $\leq 35$ / <i>number of test results in three months <math>\leq 35</math>:</i> Nachweis mit $15 \leq n \leq 35$ in höchstens zwölf Monaten / <i>proof with <math>15 \leq n \leq 35</math> in twelve months at most</i> Vorschlag für Werke mit hoher Prüfdichte / <i>Recommendation for plants with high testing frequency:</i> Anzahl Prüfergebnisse in drei Monaten $> 35$ / <i>number of test results in three months <math>&gt; 35</math>:</i> Nachweiszeitraum höchstens drei Monate / <i>proof period three months at most</i>
Einführung Methode C: Kontrollkarten <i>Introduction of Method C: control charts</i>	Es wird vorgeschlagen, neben den „klassischen“ Methoden des Konformitätsnachweises für die „Erstherstellung“ (Methode A) und die „Stetige Herstellung“ (Methode B) als Methode C das System sogenannter „Kontrollkarten“ in die Norm zu integrieren. Die Methode C kombiniert den Konformitätsnachweis im klassischen Sinne mit einem Instrument der werkseigenen Produktionskontrolle [9]. Sie darf nur verwendet werden, wenn die Betonherstellung einer Fremdüberwachung unterliegt oder die Anwendung der Methode ausdrücklich zwischen dem Verfasser der Festlegung und dem Betonhersteller vereinbart wurde. Für das einzuführende System muss nachgewiesen werden, dass der sogenannte Durchschlupf (average outgoing quality limit (AOQL)) nicht größer als 5,0 % ist. Diese Bedingung gilt als erfüllt, wenn die Vorgaben und Anforderungen des neu eingeführten Anhangs H eingehalten werden. <i>It is recommended that the system of “control charts” should be integrated into the standard as Method C alongside the “classical” methods of conformity control for the “initial production” (Method A) and for “continuous production” (Method B). Method C combines the proof of conformity in the classical sense with an instrument of factory production control [9]. It may only be used if the concrete production is subject to third-party inspection or the application of the method has been expressly agreed between the specifier and the concrete producer. For the system that is to be introduced it must be proved that the average outgoing quality limit (AOQL) is not greater than 5.0 %. This condition is considered to be fulfilled if the targets and requirements of the newly introduced Appendix H are met.</i>
Konformitätsnachweis und Identitätsprüfung für andere Parameter als die Druckfestigkeit <i>Conformity control and identity testing for parameters other than compressive strength</i>	Für die Konsistenz einschließlich des selbstverdichtenden Betons, den Luftgehalt und den Nachweis von Fasergehalt/-verteilung werden Konformitätskriterien bzw. Kriterien für die Abnahmeprüfung auf Basis von Einzelwerten in Form von Grenzwertabweichungen, bezogen auf den festgelegten Wert bzw. die Klasse am Ort der Übergabe, vorgeschlagen (Tabelle 23 und Abschnitte B.4 und B.5) <i>Conformity criteria and criteria for the acceptance test based on individual values in the form of limit deviations, relative to the specified value or class at the point of delivery, are proposed for the consistency, including that of self compacting concrete, the air content and the proof of fibre content/distribution (Table 23 and Sections B.4 and B.5)</i>

### 3 Leistungsbezogene Entwurfsverfahren (Labor-Performance) am Beispiel Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR)

Die Dauerhaftigkeit von Betonbauwerken wird üblicherweise durch deskriptive Regeln an die Betonzusammensetzung (Anforderungen an Ausgangsstoffe, maximaler (äquivalenter) Wasserzementwert, Mindestzementgehalt etc.) sowie Anforderungen an die Betondeckung und die Nachbehandlung sichergestellt. Die Leistung (Performance) des Betons für neue Bauwerke ergibt sich somit aus Festlegungen, die aus Erfahrungen mit Bauwerken im Bestand in der Praxis resultieren.

Unter anderen können es die folgenden drei Gründe notwendig machen, von diesem Vorgehen abzuweichen und die Leistung des Betons bzw. sein Potenzial in Dauerhaftigkeitsprüfungen im Labor nachzuweisen:

- Eine Mindestlebensdauer  $\gg 50$  Jahre ist nachzuweisen
- Neue Baustoffe bzw. Baustoffe ohne Langzeiterfahrung sollen zur Anwendung kommen
- Es liegen besondere Umgebungsbedingungen/Beanspruchungen vor.

Mit Bezug auf die Regelungen zur Vermeidung einer schädigenden Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR) kann zunächst festgestellt werden, dass mit der gültigen Alkali-Richtlinie des Deutschen Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb) einschließlich der 1. Berichtigung (April 2010) und der 2. Berichtigung (April 2011) ein Regelwerk vorliegt, mit dem sichere und praxisgerechte Lösungen für das Bauen mit Beton in allen Anwendungsbereichen des Hoch- und Inge-

- new construction materials or construction materials without long-term experience are to be used
- there are special ambient conditions and/or stresses.

With reference to the regulations for avoiding a harmful alkali-silica reaction (ASR) it should first be noted that with the current Alkali Guidelines issued by the DAfStb (German Committee for Structural Concrete) including the 1<sup>st</sup> revision (April 2010) and the 2<sup>nd</sup> revision (April 2011) there are regulations in place with which it is possible to implement safe and practical solutions for construction with concrete in all application areas of building construction and civil engineering (moisture classes WO, WF, WA) using regionally available concrete constituents. However, over the years the guidelines have developed into regulations that are relatively difficult for the user to read. It is currently the task of one of the DAfStb's working groups to make the Alkali Guidelines more “readable” again.

As far as ASRs are concerned the limits of the descriptive system have been reached in two areas of application:

- concrete roads of the SV and I to III construction classes as defined in RStO (Guidelines for the standardization of bearing courses for traffic areas)
- concrete for airfields.

In both areas the concrete is exposed to special ambient conditions or is subject to high stresses: action of de-icing salt/agent with additional high dynamic loads from traffic.

Reconciling research results with practical experience has always been considered as essential for up-dating the Alkali Guidelines. In

nieurbaus (Feuchtigkeitsklassen WO, WF, WA) unter Verwendung regional verfügbarer Betonausgangsstoffe umgesetzt werden können. Die Richtlinie hat sich allerdings über die Jahre zu einem für den Anwender relativ schwer lesbaren Regelwerk entwickelt. Der Aufgabe, die Alkali-Richtlinie wieder besser „lesbar“ zu machen, stellt sich derzeit eine Arbeitsgruppe des DAfStb.

Im Hinblick auf das Thema AKR wurden die Grenzen des deskriptiven Systems in zwei Anwendungsgebieten erreicht:

- Betonfahrbahnen der Bauklassen SV und I bis III nach RStO
- Flugbetriebsflächen aus Beton

In beiden Bereichen unterliegt der Beton besonderen Umgebungsbedingungen bzw. ist hohen Beanspruchungen ausgesetzt: Tausalz-/Taumiteleinwirkung mit zusätzlichen hohen dynamischen Lasten aus Verkehr.

Für die Fortschreibung der Alkali-Richtlinie wurde stets ein Abgleich von Forschungsergebnissen mit praktischen Erfahrungen als notwendig erachtet. Dazu gehörten im Falle von Schäden durch eine Alkali-Kieselsäure-Reaktion insbesondere nachvollziehbare Angaben über die verwendeten Gesteinskörnungen (Herkunft und Zusammensetzung), die verwendeten Zementarten und Zementmengen sowie der Alkaligehalte in den Betonen. Weiterhin musste geklärt sein, ob unter Einhaltung der zum Zeitpunkt der Schadensfeststellung gültigen Alkali-Richtlinie ein Schaden verhindert worden wäre. Für neu in die Alkali-Richtlinie aufzunehmende Gesteinskörnungen musste ebenso ein an der Praxis evaluiertes Prüfverfahren zur Einstufung in eine Alkaliempfindlichkeitsklasse vorhanden sein. Erst wenn diese Fragen beantwortet werden konnten, wurden weitere Maßnahmen in der Alkali-Richtlinie festgeschrieben. Diese Vorgehensweise hat sich bewährt und soll auch zukünftig erhalten bleiben. Bei Beibehaltung der Maßnahmen für die Feuchtigkeitsklasse WS (Betonfahrbahnen der Bauklassen SV und I bis III gemäß RStO) in der Alkali-Richtlinie wäre aufgrund von neueren Entwicklungen im Jahr 2008 die Aufnahme weiterer Gesteinskörnungen erforderlich gewesen. Dies hätte eine sofortige Überarbeitung bei gleichzeitiger Klärung aller im vorherigen Absatz beschriebenen offenen Fragen bedeutet [10].

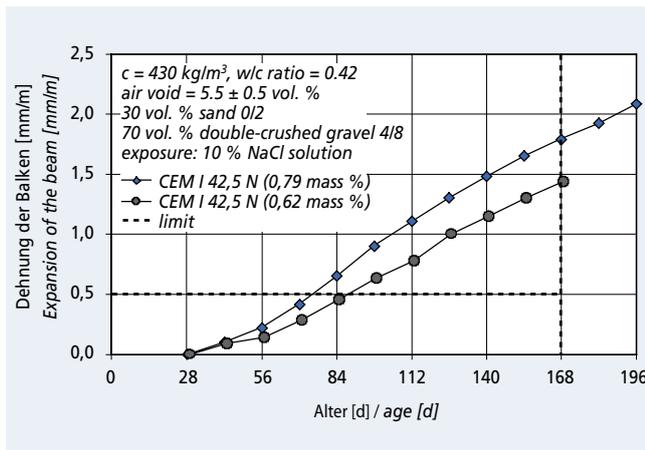
Um für die genannten Bereiche zeitnah praxisgerechte Lösungen zur Verfügung zu stellen, wurde an der Bauhaus-Universität Weimar (FIB) und im Forschungsinstitut in Düsseldorf (FIZ) jeweils ein Verfahren entwickelt: Betonversuch mit FIB-Klima-wechselagerung [11] bzw. 60-°C-Betonversuch mit Alkalizufuhr

the instances of damage by an alkali-silica reaction this particularly includes replicable information about the aggregate used (origin and composition), the types and quantities of cement used and the alkali levels in the concretes. It was also necessary to clarify whether damage would have been prevented by compliance with the Alkali Guidelines valid at the time when the damage was detected. A test method that has been evaluated in practice for classification in an alkali-sensitivity class also had to be available for aggregates that were to be newly incorporated in the Alkali Guidelines. Only when these questions had been answered, further measures were specified in the Alkali Guidelines. This procedure has proved successful and will be retained in the future. If the measures for the WS moisture class (concrete roads of the SV and I to III construction classes as defined in the RStO) had been retained in the Alkali Guidelines it would have been necessary to include other aggregates due to recent developments in 2008. This would have meant immediate revision combined with clarification of all the unanswered questions described in the previous paragraph [10].

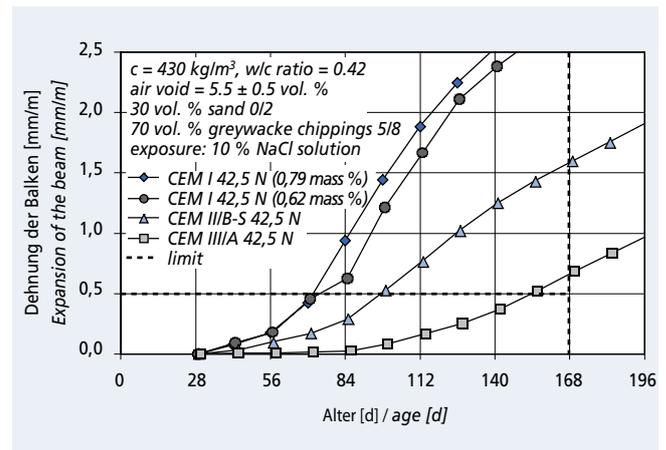
In order to provide practical solutions promptly for the above-mentioned areas the FIB (Bauhaus University Weimar) and the FIZ (Research Institute of the Cement Industry) each developed a method: concrete test with FIB cyclic climate storage [11] and 60 °C concrete test with external supply of alkalis [12] respectively. The two methods lead to comparable evaluation of identical concrete technology solutions and are recognized by the BMVBS (Federal Ministry of Transport, Building and Urban Development) [13].

Figs. 1 to 4 show examples of the results of tests with the 60 °C concrete test with external supply of alkalis through a 10 % sodium chloride solution (NaCl). Figs. 1 and 2 make it clear that with appropriate reactivity of the aggregate and external supply of alkalis through de-icing salts harmful expansion due to an ASR can be induced even if cements with a low effective alkali content are used. Aggregates that have a sufficiently low sensitivity to alkalis must therefore always be used for concrete roads [15]. Nevertheless, the course of damage in concrete can be influenced to a certain extent by the choice of cement – in this case cements containing granulated blastfurnace slag.

The choice of an aggregate with sufficiently low sensitivity to alkalis is therefore essential for the durability of concrete roads. Fig. 3 shows how the suitability of aggregates for concrete roads can be



**Bild 1:** Performance-Prüfung mit dem 60-°C-Betonversuch und Alkalizufuhr von außen durch eine 10%ige NaCl-Lösung; Beispiel: Reaktiver Kies-Edelsplitt vom Oberrhein und Portlandzement mit einem  $\text{Na}_2\text{O}$ -Äquivalent von 0,62 M.-% bzw. 0,79 M.-% [14]  
**Figure 1:** Performance testing with the 60 °C concrete test and external supply of alkalis through a 10 % NaCl solution. Example: reactive double-crushed gravel from the Upper Rhine and Portland cement with an  $\text{Na}_2\text{O}$  equivalent of 0.62 mass % or 0.79 mass % [14]



**Bild 2:** Performance-Prüfung mit dem 60-°C-Betonversuch und Alkalizufuhr von außen durch eine 10%ige NaCl-Lösung; Beispiel: Reaktiver Grauwacke-Splitt und verschiedene Fahrbahndeckenzemente (Portlandzement  $\text{Na}_2\text{O}$ -Äqu. = 0,62 M.-% und 0,79 M.-%, CEM II/B-S 42,5 N und CEM III/A 42,5 N; CEM III/A 42,5 N erfüllt auch Anforderungen an NA-Zement) [14]  
**Figure 2:** Performance testing with the 60 °C concrete test and external supply of alkalis through a 10 % NaCl solution. Example: reactive greywacke chippings and various cements for concrete roads (Portland cement  $\text{Na}_2\text{O}$  equivalent = 0.62 mass % or 0.79 mass %, CEM II/B-S 42,5 N cement and CEM III/A 42,5 cement; the CEM III/A 42,5 also fulfils the requirements for low-alkali cement) [14]

von außen [12]. Beide Verfahren führen zu einer vergleichbaren Bewertung identischer betontechnischer Lösungen und sind vom BMVBS anerkannt [13].

Die Bilder 1 bis 4 zeigen beispielhaft Ergebnisse solcher Prüfungen mit dem 60-°C-Betonversuch und Alkalizufuhr von außen durch eine 10%ige Natriumchlorid-Lösung (NaCl). Die Bilder 1 und 2 verdeutlichen, dass bei entsprechender Reaktivität der Gesteinskörnung und bei einer Alkalizufuhr von außen durch Tausalze auch dann schädliche Dehnungen infolge AKR induziert werden können, wenn Zemente mit einem niedrigen wirksamen Alkaligehalt zum Einsatz kommen. Bei Fahrbahndeckenbetonen müssen deshalb immer ausreichend alkaliunempfindliche Gesteinskörnungen eingesetzt werden [15]. Gleichwohl kann der Verlauf der Schädigung des Betons in gewissem Umfang durch die Auswahl des Zements – in diesem Fall durch hüttensandhaltige Zemente – beeinflusst werden.

Wesentlich für die Dauerhaftigkeit von Betonfahrbahndecken ist somit die Auswahl einer ausreichend alkaliunempfindlichen Gesteinskörnung. Bild 3 zeigt, wie mit dem 60-°C-Betonversuch und einer Alkalizufuhr von außen die Eignung von Gesteinskörnungen für Betonfahrbahndecken durch eine WS-Grundprüfung beurteilt werden kann. Verwendet wurde eine „Grenzrezeptur“ für Waschbeton ( $z = 430 \text{ kg/m}^3$ ,  $w/z = 0,42$ ) mit Fahrbahndeckenzement (Portlandzement mit einem  $\text{Na}_2\text{O}$ -Äquivalent von 0,80 M.-%).

Im gezeigten Beispiel sind die Gesteinskörnungen mit den Kreis-Symbolen geeignet für den Einsatz in der Feuchtigkeitsklasse WS. Der Einsatz der übrigen Gesteinskörnungen würde aufgrund der Überschreitung des Grenzwerts bzw. aufgrund eines deutlichen Dehnungsanstiegs zum Beurteilungszeitpunkt in Kombination mit nachgewiesenen AKR-Reaktionsprodukten (Dünnschliff) für Waschbeton in der Feuchtigkeitsklasse WS nicht empfohlen werden. Dieser Ansatz einer WS-Grundprüfung zum Nachweis der Eignung von Gesteinskörnungen für die Feuchtigkeitsklasse WS soll Eingang in das zukünftige Regelwerk zum Bau von Fahrbahndecken aus Beton finden.

Hintergrund des Konzepts der WS-Grundprüfung ist einerseits, dass in der aktuellen Praxis die „klassischen“ Gesteinskörnungsuntersuchungen (z.B. petrographische/mineralogische Charakterisierung, Schnelltests (Referenz- und Alternativverfahren) und der 40-°C-Betonversuch nach Alkali-Richtlinie, Teil 3) allein

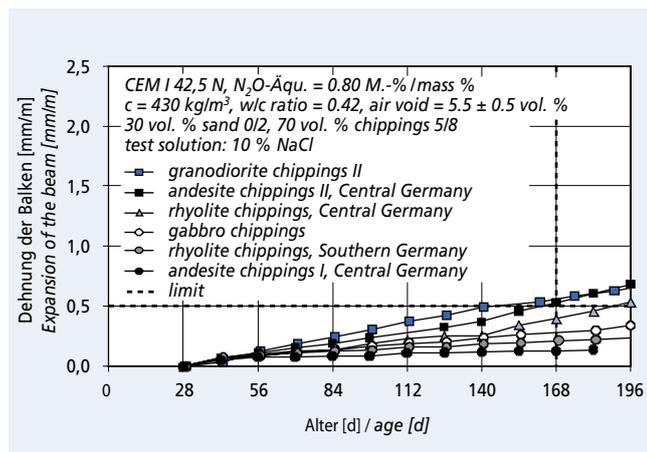
assessed by a WS aggregate test using the 60 °C concrete test and external supply of alkalis. A “border mix formulation” for exposed aggregate concrete ( $c = 430 \text{ kg/m}^3$ ,  $w/c = 0.42$ ) with Portland cement with an  $\text{Na}_2\text{O}$  equivalent of 0.80 mass % was used.

In the example shown the aggregates with circular symbols are suitable for use in the WS moisture class. Use of the other aggregates for exposed aggregate concrete in the WS moisture class would not be recommended because the limit was exceeded or because of a significant increase in expansion at the time of assessment combined with detected ASR reaction products (thin sections). This approach of using a WS aggregate test to prove the suitability of aggregates for the WS moisture class is to be included in the future regulations for the construction of concrete roads.

The background to the concept of WS aggregate testing is partly that, in current practice, the “classical” aggregate investigations (e.g. petrographic/mineralogical characterization, accelerated tests (reference and alternative methods) and the 40 °C concrete test specified in the Alkali Guidelines, Part 3) are not in themselves sufficient in all cases for reliable assessment of the ASR damage potential of aggregates in concrete compositions for the WS moisture class. An example of this is shown in Fig. 4. Significant expansions were found in the concrete test with external supply of alkalis even though the accelerated test method (reference method) (ATM) had been passed. In doubtful cases it is therefore necessary to carry out an ASR performance test for the specific concrete composition intended for the project. However, this is frequently not feasible within the normal time frame for construction projects because of the long duration of the test. In these doubtful cases the aggregates must currently be replaced by aggregates that expert opinion has already shown to be free from doubt. To avoid such situations in the future it is intended that the fundamental suitability of aggregates should be investigated in advance independently of the actual construction project using a concrete composition specific to the WS moisture class [18].

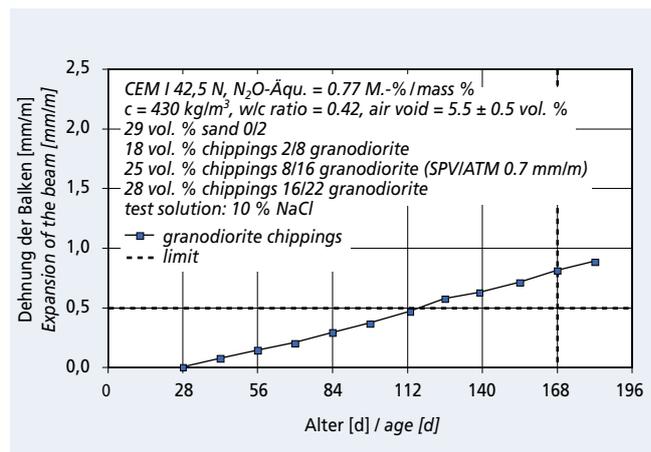
#### 4 Compressive strength versus durability

The increasing use of other main constituents in cement and therefore the continuous reduction of the content of Portland cement clinker in the cement have led to an improvement in the specific construction material profiles for cement and concrete, especially with respect to their global warming potential. The consistent



**Bild 3:** WS-Grundprüfung - Betonzusammensetzung für Oberbeton (0/8) ( $z = 430 \text{ kg/m}^3$ ,  $w/z = 0,42$ ) mit Fahrbahndeckenzement (Portlandzement mit einem  $\text{Na}_2\text{O}$ -Äquivalent von 0,80 M.-%) – mit dem 60-°C-Betonversuch und Alkalizufuhr von außen durch eine 10%ige NaCl-Lösung; Beispiel: Verschiedene Gesteinskörnungen [16]

**Figure 3:** Aggregate test for WS moisture class – concrete composition for top course concrete (0/8) ( $c = 430 \text{ kg/m}^3$ ,  $w/c = 0.42$ ) with Portland cement with an  $\text{Na}_2\text{O}$  equivalent of 0.80 mass % – with the 60 °C concrete test with external supply of alkalis through a 10 % NaCl solution. Example: various aggregates [16]



**Bild 4:** WS-Grundprüfung – Betonzusammensetzung für Oberbeton ( $D > 8 \text{ mm}$ ) und Unterbeton ( $z = 360 \text{ kg/m}^3$ ,  $w/z = 0,38$ ) mit Fahrbahndeckenzement (Portlandzement mit einem  $\text{Na}_2\text{O}$ -Äquivalent von 0,77 M.-%) – mit dem 60-°C-Betonversuch und Alkalizufuhr von außen durch eine 10%ige NaCl-Lösung; Beispiel: Granodiorit, SPV = Schnellprüfverfahren [17]

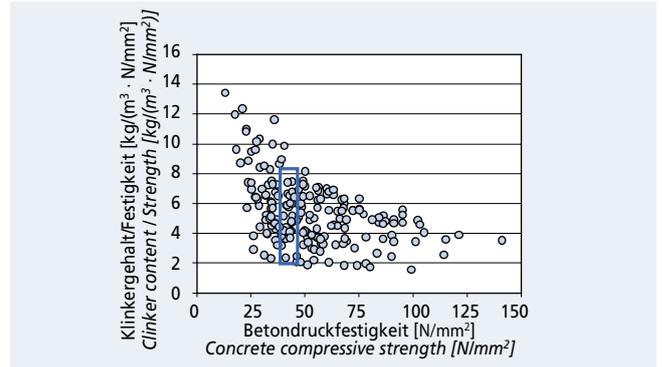
**Figure 4:** Aggregate test for WS moisture class – concrete composition for top course concrete ( $D > 8$ ) and base course concrete ( $c = 360 \text{ kg/m}^3$ ,  $w/c = 0.38$ ) with Portland cement with an  $\text{Na}_2\text{O}$  equivalent of 0.77 mass % – with the 60 °C concrete test with external supply of alkalis through a 10 % NaCl solution. Example: granodiorite, ATM = accelerated test method [17]

nicht in allen Fällen ausreichen, um das AKR-Schädigungspotenzial von Gesteinskörnungen in Betonzusammensetzungen für die Feuchtigkeitsklasse WS sicher zu beurteilen. Ein Beispiel hierfür zeigt Bild 4. Trotz bestandenem Schnellprüfverfahren (Referenzverfahren) (SPV) zeigen sich in der Betonprüfung mit Alkalizufuhr von außen signifikante Dehnungen. In Zweifelsfällen ist daher für die vorgesehene projektspezifische Betonzusammensetzung die Durchführung einer AKR-Performance-Prüfung erforderlich, die aber aufgrund der langen Prüfdauer häufig nicht innerhalb des praxisüblichen Zeitrahmens für Bauvorhaben durchführbar ist. In diesen Zweifelsfällen müssen derzeit die Gesteinskörnungen gegen solche ausgetauscht werden, deren Eignung gutachterlich bereits zweifelsfrei festgestellt wurde. Um derartige Situationen zukünftig zu vermeiden, ist vorgesehen, die prinzipielle Eignung von Gesteinskörnungen unabhängig vom konkreten Bauvorhaben in einer WS-spezifischen Betonzusammensetzung vorab zu untersuchen (Gesteinskörnungsprüfung für WS = WS-Grundprüfung) [18].

**4 Druckfestigkeit gegen Dauerhaftigkeit**

Die zunehmende Verwendung weiterer Zementhauptbestandteile und damit die kontinuierliche Reduzierung des Portlandzementklinkergehalts im Zement hat in Deutschland zu einer Verbesserung der spezifischen Baustoffprofile für Zement und Beton insbesondere im Hinblick auf das Treibhauspotenzial geführt. Die konsequente Entwicklung des Inlandsversands zu immer mehr Zementen mit mehreren Hauptbestandteilen [19] trug zu einer deutlichen Reduzierung des Klinker/Zement-Faktors bei. Dieser betrug im Jahr 1987 86 % und wurde bis zum Jahr 2009 auf 75 % vermindert [20]. Die Frage, ob sich auf diesem Wege eine weitere deutliche Reduzierung des mittleren Klinker/Zement-Faktors in Deutschland realisieren lässt, hängt einerseits von der Verfügbarkeit von Zementhauptbestandteilen wie z.B. Hüttensand und Flugasche ab. Auf der anderen Seite bestehen aktuell berechtigt Grenzen der Einsatzmöglichkeiten des Kalksteins als Zementhauptbestandteil in Betonen mit den Betonzusammensetzungen nach DIN EN 206-1/DIN 1045-2.

Vor diesem Hintergrund beschäftigen sich in der aktuellen Diskussion der Umsetzung von Nachhaltigkeitsprinzipien beim Bauen mit Beton verschiedene Stellen mit der Reduzierung der Umweltwirkungen in der Herstellung des Baustoffs Beton. Schlussendlich geht es unabhängig vom gewählten Ansatz um eine ökologisch wie ökonomisch effiziente Verwendung des Portlandzementklinkers, mit der zur gleichen Zeit die Qualität der Dauerhaftigkeitseigenschaften des Betons auf hohem Niveau gehalten werden muss. Aus einer im Forschungsinstitut der Zementindustrie durchgeführten Auswertung von Literaturergebnissen und eigenen Untersuchungsergebnissen ging der in Bild 5 dargestellte Zusammenhang zwi-

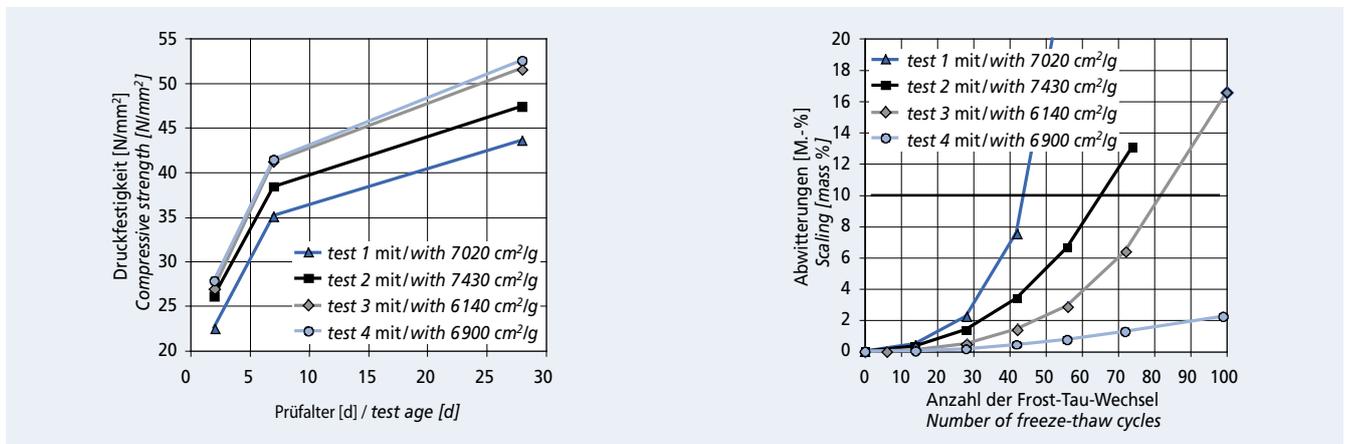


**Bild 5: Zusammenhang zwischen dem auf die Betondruckfestigkeit bezogenen Klinkergehalt (Klinker = Portlandzementklinker + Sulfat-träger + ggf. Nebenbestandteile) und der Betondruckfestigkeit (Daten aus [13, 21-27]) – markierter Bereich: Betone mit Betondruckfestigkeiten (40 ± 5) N/mm² [28]**

**Figure 5: Relationship between the clinker content relative to the concrete compressive strength (clinker = Portland cement clinker + sulfate agent + possible secondary constituents) and the concrete compressive strength itself (data from [13, 21-27]) – marked area: concretes with compressive strengths of 40 ± 5 N/mm² [28]**

trend in domestic dispatches towards ever more cements with several main constituents [19] has contributed to a significant reduction in the clinker/cement factor. In 1987 this was 86 % and by 2009 had fallen to 75 % [20]. The question as to whether a further reduction in the average clinker/cement factor can be achieved in Germany in this way depends partly on the availability of cement main constituents such as granulated blastfurnace slag and fly ash. On the other hand, there are at the moment justified limits to the possible use of limestone as a main cement constituent in concretes with concrete compositions complying with DIN EN 206-1/ DIN 1045-2.

Against this background various researches are concentrating on reducing the environmental effects in the production of concrete as a building material in the current discussion on the implementation of sustainability principles when building with concrete. Regardless of the chosen approach it is ultimately a matter of ecologically and economically efficient use of the Portland cement clinker that at the same time has to keep the quality of the durability properties of the concrete at a high level. The relationship shown in Fig. 5 between the clinker content relative to the concrete compressive strength and the concrete compressive strength itself was obtained from an evaluation carried out at the Research Institute of the



**Bild 6: Druckfestigkeitsentwicklung des Zements (links) und Abwitterungen von Betonen (z = 300 kg/m³, w/z = 0,60) im Würfelverfahren (rechts) mit Portlandkalksteinzementen unterschiedlicher Feinheit mit 30 M.-% Kalkstein [29]**

**Figure 6: Compressive strength development of the cement (left) and the scaling of concretes (c = 300 kg/m³, w/c = 0.60) in the cube method (right) with Portland-limestone cements of differing fineness containing 30 mass % limestone [29]**

schen dem auf die Betondruckfestigkeit bezogenen Klinkergehalt und der Betondruckfestigkeit hervor. Der spezifische, in diesem Fall auf das Leistungsmerkmal Betondruckfestigkeit bezogene Klinkergehalt nimmt mit steigender Druckfestigkeit ab.

Die betontechnischen Gründe für diesen Zusammenhang sind bekannt: Reduzierung des effektiven Wasserzementwerts, Optimierung der Granulometrie der Feinstoffe, Einsatz wirksamer Betonsatzmittel. Analysiert man in dieser Darstellung beispielhaft den Bereich der Druckfestigkeit von  $(40 \pm 5) \text{ N/mm}^2$  im Hinblick auf die Zusammensetzung der verwendeten Hauptbestandteile, findet man unter anderem Stoffkombinationen mit relativ geringen Klinkergehalten und sehr hohen Kalksteingehalten.

Kalkstein liegt als Hauptrohstoff des Portlandzementklinkers an jedem Standort eines Zementwerks vor, sodass bei seiner Verwendung als Zementhauptbestandteil Transportkosten sowie mit dem Transport verbundene Emissionen entfallen. Da es sich bei Kalkstein allerdings um ein Inertmaterial handelt, ist eine deutliche Erhöhung seines Anteils im Zement aufgrund der normativ festgelegten Randbedingungen, verbunden mit dem derzeit unzureichenden Kenntnisstand, nicht ohne Weiteres möglich.

Vor allem ist aber die Verkürzung des Themas auf den Aspekt „Druckfestigkeit (im Labor)“ nicht zielführend. Die Gleichmäßigkeit der Betonausgangsstoffe, die Robustheit des Betons im Baubetrieb und besonders die Dauerhaftigkeit des Betons sind entscheidende Parameter. Bild 6 verdeutlicht am Beispiel der Verwendung von Zementen mit einem Kalksteingehalt von 30 M.-% und des Frostwiderstands von Beton, dass der Zement, seine Hauptbestandteile oder ggf. der Betonzusatzstoff die Dauerhaftigkeit des Betons signifikant beeinflussen kann, ohne dass dies zwingend an der Druckfestigkeit erkennbar wäre (hier: Vergleich der Versuchszemente 3 und 4). Im dargestellten Fall sind es durch die Verfahrenstechnik der Zementherstellung bedingte granulometrische Einflüsse.

Auch im Zuge der vorbereitenden Arbeiten für die Revision der EN 206 wurde die Frage diskutiert, inwiefern die Druckfestigkeit des Zements, der Kombination Zement/Zusatzstoff oder des Betons stellvertretend (engl.: „as a proxy criterion“) eine Aussage über Dauerhaftigkeitseigenschaften zulässt. Die Frage resultiert aus der gelebten Praxis, im Rahmen deskriptiver Anwendungsregeln (z.B. Anwendung der Zemente nach DIN EN 197-1 gemäß den Tabellen F.3.2 bis F.3.4 in DIN 1045-2 oder der Verwendung von Kombinationen nach British Standard BS 8500-2 gemäß der Anwendungsregeln in BS 8500-1), auf der Basis festigkeitsbezogener Konformitätsnachweise für Zement, Kombination und Beton auf eine konkrete Überprüfung der Dauerhaftigkeit zu verzichten. Dies erscheint in beiden Fällen gerechtfertigt aufgrund der umfangreichen Praxiserfahrungen der betreffenden Länder, mit denen im Rahmen der jeweiligen nationalen Anwendungsregeln (Betonzusammensetzung, Betondeckung und Nachbehandlung) sowie unter den entsprechenden klimatischen Bedingungen, der Bautradition und dem Sicherheitsbedürfnis die Stoffe erfolgreich eingesetzt wurden.

Nicht ohne weitere Überprüfung der Dauerhaftigkeitseigenschaften zulässig ist diese Vorgehensweise bei neuen Stoffen. Auch eine unmittelbare Übertragung der Anwendungsregeln eines Landes auf die Verhältnisse in einem anderen Land verbietet sich aus den zuvor genannten Gründen. Anschaulich darstellen lässt sich dies im Vergleich von Anwendungsregeln für Zemente verschiedener Länder am Beispiel von Außenbauteilbetonen (Tafel 3).

So lässt Italien auf der Basis national verfügbarer und bewährter Rohstoffe in Außenbauteilen die Verwendung einer deutlich größeren Bandbreite von Zementen zu als z.B. Deutschland. Der Vergleich der betontechnischen Randbedingungen zeigt, dass die Voraussetzungen hierfür in Italien ( $\text{max } w/z = 0,50$ ) aber auch andere sind als in Deutschland ( $\text{max } w/z = 0,60$ ).

Ein anderes Beispiel ist die Anwendung hüttensandhaltiger Zemente mit hohem Sulfatwiderstand nach DIN 1164-10 (HS) bzw. EN 197-1 (SR) im Vergleich zu Kombinationen aus Hüttensandmehl als Betonzusatzstoff und Portlandzement [30]: Im Gegensatz zu den deutschen Erfahrungen mit hüttensandhaltigen Hochofen-

Cement Industry of the results in the literature and the results of in-house investigations. The specific clinker content, in this case relative to the concrete compressive strength, decreases with increasing compressive strength.

The concrete technology reasons for this relationship are well known: reduction of the effective water/cement ratio, optimization of the granulometry of the fines, use of effective concrete admixtures. If, for example, the compressive strength range of  $40 \pm 5 \text{ N/mm}^2$  in this diagram is examined with respect to the composition of the main constituents material combinations are found with relatively low levels of clinker and very high levels of limestone.

Limestone is the main raw material for Portland cement clinker so it is available at every cement plant site. This means that transport costs, and the emissions associated with transport, do not apply when limestone is used as a cement main constituent. However, limestone is an inert material so any significant increase in its proportion in cement is not readily possible because of the constraints laid down in the standards coupled with current inadequate level of knowledge.

However, it is not constructive to abbreviate the topic to the aspect of “compressive strength (in the laboratory)”. The uniformity of the concrete constituents, the robustness of the concrete during construction work and, in particular, the durability of the concrete are crucial parameters. Fig. 6 uses the example of the use of cements with a limestone content of 30 mass % and of the freeze-thaw resistance of concrete to show that the cement, its main constituents or possibly the concrete addition can have a significant influence on the durability of the concrete without this necessarily being detectable in the compressive strength (in this case compare test cements 3 and 4). In this instance this is due to the granulometric effects caused by the process technology of the cement production.

The question about the extent to which the compressive strength of the cement, of the cement/addition combination or of the concrete can be used as a proxy criterion to provide information about the durability characteristics was also discussed during the preliminary work for the revision of EN 206. The question arose from the practice of dispensing with a specific check on the durability in the context of descriptive application rules (e.g. use of the cements as specified in DIN EN 197-1 in accordance with Tables F3.2 to F3.4 in DIN 1045-2 or the use of combinations as specified in British Standard BS 8500-2 in accordance with the application rules in BS 8500-1) on the basis of strength-related proof of conformity for cement, combinations and concrete. In both cases this seems justified because of the extensive practical experience of the countries involved with which the materials have been used successfully within the framework of the respective national application rules (concrete composition, concrete cover and curing) as well as under the corresponding climatic conditions, building traditions and safety requirements.

This procedure is not permissible with new materials without further testing of the durability characteristics. Direct transfer of the application rules of one country to the conditions in another country is also out of the question for the above-mentioned reasons. This is vividly illustrated by comparison of the application rules for cements in different countries using the example of exterior component concretes (Table 3).

This shows that on the basis of nationally available and proven raw materials Italy permits the use of a significantly wider range of cements in exterior components than, for example, Germany. However, comparison of the concrete technology conditions shows that the preconditions for this in Italy ( $\text{max. } w/c = 0.50$ ) are also different from those in Germany ( $\text{max. } w/c = 0.60$ ).

Another example is the use of sulfate-resisting cements containing granulated blastfurnace slag as specified in DIN 1164-10 (HS) or EN 197-1 (SR) compared with combinations of ground granulated blastfurnace slag, used as a concrete addition, and Portland cement [30]. In contrast to the German experience with blastfurnace cements containing granulated blastfurnace slag (HS or SR cement with a granulated blastfurnace slag content  $\geq 66$  mass %) various investigations from Great Britain and the USA provide evidence

Tafel 3: Vergleich der Anwendungsregeln für Zemente im Rahmen nationaler Anhänge zur europäischen Betonnorm EN 206-1 am Beispiel eines Betons für die Expositionsklasse XF1  
 Table 3: Comparison of the application rules for cements given in the national appendices to the European concrete standard EN 206-1 based on the example of a concrete for exposure class XF1

Land Country	max (w/z) <sub>eq</sub> / max. (w/c) <sub>eq</sub>	min z / min. c [kg/m <sup>3</sup> ]	CEM I	CEM II						CEM III		CEM IV		CEM V	
				S		LL		M		A	B	A	B	A	B
				A	B	A	B	A	B						
Österreich Austria	0,55	300	X	X	X				(X)	X	(X)				
Belgien Belgium	0,55	300	X	X	X	X	X	X	X	X	X			(X)	
Dänemark Denmark	0,55	150	(X)			(X)									
Finnland Finland	0,60	270	X	X	X	X		X		X	X				
Deutschland Germany	0,60	280	X	X	X	X	○	(X)	(X)	X	X	○	(X)	(X)	(X)
Irland Ireland	0,60	300	X			X									
Italien Italy	0,50	320	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Niederlande Netherlands	0,55	300	X	X	X	(X)	(X)	(X)	(X)	X	X	(X)	(X)	(X)	(X)
Norwegen Norway	0,60	250	X	X		X									
Großbritannien Great Britain	0,60	280	X	X	X	X				X	X	(X)	(X)		
			X	erlaubt permitted			nicht erwähnt not mentioned		(X)	mit Einschränkungen with restrictions		○	nicht erlaubt not permitted		

78

zementen (HS- bzw. SR-Zement mit einem Hüttensandgehalt ≥ 66 M.-%) belegen verschiedene Untersuchungen aus Großbritannien und den USA, dass die gemeinsame Verwendung von Hüttensandmehl (Anteil > 65 M.-%) und Portlandzement keinesfalls immer einen höheren Sulfatwiderstand des Betons bewirkt als die alleinige Verwendung eines Portlandzements. Als Beispiel werden in [30] Ergebnisse aus Langzeituntersuchungen von D.C. Stark [31] über einen Zeitraum von bis zu 16 Jahren sowohl unter Labor- als auch unter Freilandbedingungen gezeigt. Die Betonprüfkörper wurden einem hohem Sulfatangriff und einem Befeuchtungs-Trocknungs-Zyklus ausgesetzt. Bild 7 zeigt in graphischer Darstellung das Abwitterungsverhalten von Prüfkörpern auf Basis von Portlandzement bzw. von Gemischen aus Portlandzement und Hüttensandmehl. Die hüttensandmehlhaltigen Prüfkörper zeigten stärkere Abwitterungen als die Prüfkörper auf Basis von Portlandzement (= „ohne HSM“) [31].

**5 Schlussfolgerungen**

Die technische Weiterentwicklung des Baustoffs bei gleichzeitiger Berücksichtigung umweltpolitischer und wirtschaftlicher Randbedingungen macht Beton heute zu einem komplexen System verschiedener Betonausgangsstoffe, dass sich in verschiedensten Umgebungsbedingungen bewähren muss. Zur gleichen Zeit erschwert die „... im Allgemeinen vorherrschende Fokussierung auf Planungs- und Baukosten ... die Umsetzung langfristiger Ziele und verstellt den Blick auf nachhaltige, den Lebenszyklus von Bauwerken optimierende Lösungen.“ (Zitat aus dem Leitbild Bau (vgl. [www.leitbild-bau.de](http://www.leitbild-bau.de))). In dieser Gemengelage bedarf es einer Regelwerksetzung, die einerseits flexible Randbedingungen für Baustoffhersteller und Bauausführende formuliert und andererseits auf die Bedürfnisse des Bauherrn zugeschnittene sichere und dauerhafte Bauwerke zur Folge hat. Die Autoren des Leitbilds formulieren es so: „Von der Politik erwarten wir, dass sie den Qualitätswettbewerb insbesondere durch die Setzung kompetenz-, nachhaltigkeits- und innovationsorientierter Rahmenbedingungen fördert.“ Begreift man die Langlebigkeit, sprich Dauerhaftigkeit, als eine Grundanforderung an nachhaltige Bauwerke, so kann die Beton-

that the joint use of ground granulated blastfurnace slag (proportion > 65 mass %) and Portland cement does not by any means always produce a higher sulfate resistance of the concrete than the sole use of a Portland cement. Results from long-term investigations by D.C. Stark [31] over a period of up to 16 years under both laboratory and outdoor conditions are shown as an example in [30]. The concrete test pieces were exposed to severe sulfate attack and a wetting-drying cycle. The diagram in Fig. 7 shows the scaling behaviour of test pieces based on Portland cement and on mixtures of Portland cement and ground granulated blastfurnace slag. The

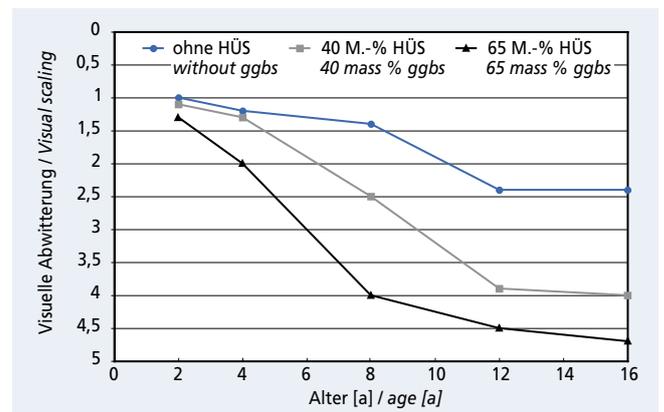


Bild 7: Visuelle Abwitterungsraten von Betonprüfkörpern auf Basis von Portlandzement („ohne HSM“) und Portlandzement/Hüttensandmehl (h) -Gemischen (w/z = 0,37...0,39, (z+h) = 390 kg/m<sup>3</sup>, Hüttensandmehlanteil 40 M.-% bzw. 65 M.-%), Sulfatkonzentration der Lagerlösung 65000 ppm [30, 31]  
 Figure 7: Visual scaling rates of concrete test pieces based on Portland cement (“without ggbs”) and mixtures of Portland cement and blastfurnace slag meal (h) (w/z = 0.37 ...0.39 (c+h) = 390 kg/m<sup>3</sup>, proportion of ground granulated blastfurnace slag 40 mass % or 65 mass %), sulfate concentration of the storage solution 65000 ppm [30, 31]

bauweise ihre Stärke dann voll ausspielen, wenn wir das Regelwerk und das Handeln aller am Bau Beteiligten auf diese Zielgröße ausrichten. Wir sollten also nicht der Versuchung erliegen, die einfachen Lösungen zu suchen: Druckfestigkeit alleine sichert nicht die Dauerhaftigkeit. Verspielt die Betonbauweise einmal das über Jahrzehnte gewonnene Vertrauen als langlebiger Baustoff, dürfte es ebenso lange dauern, dieses Vertrauen zurückzugewinnen. In diesem Zusammenhang wird man ggf. auch über den einen oder anderen Aspekt der qualitätssichernden Maßnahmen entlang der gesamten Wertschöpfungskette noch einmal sprechen müssen. Sucht man nach einer Kurzformel, bietet es sich an, den Satz „Vertrauen ist gut ...“ in der landläufig bekannten Art und Weise zu Ende zu bringen: „... Kontrolle ist besser.“

test pieces containing ground granulated blastfurnace slag exhibited more severe scaling than the test pieces based on Portland cement (= “without ggbs”) [31].

## 5 Conclusions

The technical development of concrete as a construction material while at the same time taking environmental policy and economic constraints into account has now turned concrete into a complex system of different concrete constituents that has to prove successful under widely varying ambient conditions. At the same time the “...generally prevalent concentration on design and construction costs ... [hampers] the implementation of long-term goals and shifts the focus to sustainable solutions that optimize the life cycle of structures.” (Quotation from the Mission Statement for Construction (c.f. [www.leitbild-bau.de](http://www.leitbild-bau.de))). In this conflicting situation there is a need for regulations that not only formulate flexible boundary conditions for the producers of construction materials and for the contractors but also result in safe and durable structures tailored to the needs of the client. The authors of the mission statement formulate it in this way: “we expect the policies to promote quality competition, in particular by setting boundary conditions based on competence, sustainability and innovation”. If longevity, i.e. durability, is taken as a basic requirement for sustainable structures then construction with concrete can display its strengths to the full if the regulations and the actions of all those involved in construction are directed towards this target parameter. We should therefore not succumb to the attempt to look for simple solutions: compressive strength alone does not ensure durability. If construction with concrete ever loses the trust established over decades as a long-lasting construction material it would take just as long to win back this trust. In this connection it may also be necessary reconsider one or two aspects of the measures for ensuring the quality along the entire value-added chain. This is summarized appropriately by the sentence “Trust is good, control is better”.

## Literatur / Literature

- [1] Musterbauordnung, MBO : Fassung November 2002
- [2] Verordnung (EU) Nr. 305/2011 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 9. März 2011 zur Festlegung harmonisierter Bedingungen für die Vermarktung von Bauprodukten und zur Aufhebung der Richtlinie 89/106/EWG des Rates, Amtsblatt der Union L 88 vom 4.04.2011, S. 5–43
- [3] Forschungsinstitut der Zementindustrie: TB-BTc B2275-A-2/2011 Abschlussbericht „Auswirkungen der erweiterten europäischen Basisanforderungen für Bauwerke auf die Regelungen der harmonisierten technischen Spezifikationen (hEN und EAD)“ – 14.06.2011 Auftraggeber: Bundesinstitut für Bau- Stadt- und Raumforschung im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBSR)
- [4] prEN 206:2012:E Concrete – Specification, performance, production and conformity (March 2012); nicht veröffentlicht
- [5] CUR-Aanbeveling 48:2010: Assessment of the suitability of new cements for use in concrete and of the equivalent performance of concrete with additions. Procedures, criteria and test methods
- [6] Dutch assessment procedures for certification BRL 1802. Kiwa-BMC, PO Box 150, 2800 AD Gouda NL
- [7] CEN/TC 104/SC1 N717: Draft CEN/TR “Use Of k-Value Concept, Equivalent Concrete Performance Concept And Equivalent Performance Of Combinations Concept” (Stand: 26.10.2011); nicht veröffentlicht
- [8] CEN/TC 104/SC 1 N 687: Report to CEN TC 104 SC1 on activities in TG 10 “conformity evaluation” (Juni 2011); nicht veröffentlicht
- [9] CEN/TC 104/SC 1 N 686: Use of control charts in the production of concrete (October 2010); nicht veröffentlicht
- [10] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb): Erläuterungen zur Herausnahme der Anforderungen und Maßnahmen für die Feuchtigkeitsklasse WS aus der Richtlinie (April 2010)
- [11] Stark, J.; Freyburg, E.; Seyfarth, K.; Giebson, C.; Erfurt, D.: 70 years of ASR with no end in sight? ZKG International 63 (2010) H. 4 und H. 5, S. 86–95 und S. 55–70
- [12] Müller, C.; Borchers, I.; Eickschen, E.: Erfahrungen mit AKR-Prüfverfahren. Straße und Autobahn 102 (2007) H. 8, S. 528–538
- [13] Müller, C.; Severins, K.; Hauer, B.: Neue Erkenntnisse zur Leistungsfähigkeit von Zementen mit den Hauptbestandteilen Kalkstein, Hüttensand und Flugasche. beton 59 (2009) H. 10, S. 469–478, H. 11, S. 531–537
- [14] Eickschen, E.; Müller, C.: Dauerhaftigkeit von Fahrbahndeckenbeton in Waschbetonbauweise. Griffig: Aktuelles über Verkehrsflächen aus Beton (2010) H. 1, S. 2–10
- [15] Breitenbücher, R.; Sievering, C.; Schießl, P.; Wenzel, P.; Stark, J.; Seyfarth, K.; Siebel, E.; Müller, C.; Eickschen, E.; Böhm, M.: Rissbildung an Fahrbahndecken aus Beton: Auswirkungen von Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR) – Phase 1. In-situ-Untersuchungen an Fahrbahndecken aus Beton mit/ohne Risse. Wirtschaftsverlag NW, Bremerhaven 2010
- [16] Forschungsinstitut der Zementindustrie, FIZ; F.A.-Finger-Institut für Baustoffkunde Weimar, FIB: 2. Entwurf des Technischen Schlussberichts AKR im Betondeckenbau – AKR-Untersuchungen an Fahrbahndecken aus Beton mit Waschbetonoberfläche, Untersuchungen im Rahmen des FE-Vorhabens 89.214/2008/AP – Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung vertreten durch die Bundesanstalt für Straßenwesen (Auftraggeber). Düsseldorf 2010; nicht veröffentlicht
- [17] Müller, C.; Borchers, I.: AKR – Nur Probleme oder auch Lösungen? 3. Betonfachtagung Nord: Das Bauen mit Beton aus dem Blickwinkel der Dauerhaftigkeit und neuer Regelwerke, Braunschweig 29./30. September 2011
- [18] FGSV Arbeitskreis 8.2.3 „AKR“: WS-Grund- und Bestätigungsprüfung; WS-Grund- und Bestätigungsprüfung zur Beurteilung der Eignung von groben Gesteinskörnungen für die Feuchtigkeitsklasse WS – 9. Entwurf, Juli 2011
- [19] Zahlen und Daten. Bundesverband der Deutschen Zementindustrie, Berlin 2010
- [20] Tätigkeitsbericht des Vereins Deutscher Zementwerke e.V. 2007–2009, Düsseldorf 2009
- [21] Müller, C.; Lang, E.: Dauerhaftigkeit von Beton mit Portlandkalkstein- und Portlandkompositzement CEM II/M (S-LL). beton 55 (2005) H. 3, S. 131–138; H. 4, S. 197–202 und H. 5, S. 266–269
- [22] Proske, T.: Carbonatisierung von Beton mit reduziertem Zementgehalt. Tagungsband 17. Internationale Baustofftagung (ibautil) 2009, S. 2-0717 bis 2-0722
- [23] Oner, A.; Akyuz, S.: An experimental study on optimum usage of GGBS for the compressive strength of concrete. Cement & Concrete Composites (2007) H. 6
- [24] Schneider, E.; Guse, U.; Müller, H. S.: Zur Wirksamkeit von Flugasche im Beton. beton 55 (2005) H. 10, S. 488–494
- [25] Bleszynski, R.; Hooton, R.D.; Thomas, M. D.; Rogers, C. A.: Durability of ternary blend concrete with silica fume and blast-furnace slag. ACI Materials Journal (2002) H. 5
- [26] Bager, Dirch H.; Nordic Concrete Federation: Durability of exposed concrete containing secondary cementitious materials, Workshop proceeding from a nordic miniseminar, Tagungsband, 2002
- [27] Elahi, A.; Basheer, P.A.; Nanukuttan, S.V.: Mechanical and durability properties of high performance concretes containing supplementary cementitious materials. Construction and Building Materials (2010) H. 3
- [28] Müller, C.; Palm, S.: Zemente mit geringem Portlandzementklinkeranteil für die Betone der Zukunft. Tagungsunterlagen 55. BetonTage 2011, S. 86–89
- [29] VDZ-Mitteilungen Nr. 147, Düsseldorf 2011
- [30] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb): Hüttensandmehl als Betonzusatzstoff – Sachstand und Szenarien für die Anwendung in Deutschland. Schriftenreihe des DAfStb, Heft 569, Berlin 2007
- [31] Stark, D.: Performance of concrete in sulphate environments. Portland Cement Association, Skokie, USA 2002