

# Bewertung der Ergebnisse von Prüfungen zur bauaufsichtlichen Zulassung von Portlandkalksteinzementen

## Evaluation of the results of tests for building inspectorate approval of Portland limestone cements

### Übersicht

Der Portlandkalksteinzement – Kurzbezeichnung CEM II/A-L – ist ein genormtes Produkt. Sowohl die gültige deutsche Zementnorm DIN 1164-1 als auch der Entwurf der europäischen Zementnorm DIN EN 197-1 legen fest, daß dieser Zement in seinen Hauptbestandteilen zu mindestens 80 M.-% aus Portlandzementklinker und höchstens 20 M.-% aus Kalkstein bestehen muß. Für die praktische Betonanwendung kann der Portlandkalksteinzement im Vergleich zu einem entsprechenden Portlandzement hinsichtlich der Verarbeitbarkeit und der Festigkeitsentwicklung des damit hergestellten Betons von Vorteil sein. Wichtig ist aber auch, daß die Dauerhaftigkeit des Betons aus einem CEM II/A-L-Zement in vergleichbar gutem Ausmaß gewährleistet wird.

Aufgrund von Prüfergebnissen, die im Zuge der Prüfungen für die bauaufsichtliche Zulassung von Portlandkalksteinzementen in Deutschland an zehn Zementen unterschiedlicher Herstellwerke gewonnen wurden, sind für Zemente CEM II/A-L 32,5 R und entsprechende Zemente CEM I 32,5 R die wesentlichen technischen Eigenschaften verglichen worden. Erfäßt sind die Zement- und Betonfestigkeitsentwicklungen sowie als Merkmale für das Dauerhaftigkeitsverhalten der Carbonatisierungsverlauf und der Frostwiderstand sowie der Frost-Tausalz-Widerstand.

Wie die Ergebnisse zeigen, sind für den Portlandkalksteinzement keine nennenswerten Unterschiede zum Portlandzement zu erkennen. Deshalb ist die Gleichstellung dieser beiden Zementarten in dem für die baupraktische Verwendung geltenden Regelwerk, wie z.B. der DIN 1045 Beton und Stahlbeton, gerechtfertigt.

### Abstract

Portland limestone cement – abbreviation CEM II/A-L – is a standardized product. Both the relevant German cement standard DIN 1164-1 and the draft of the European cement standard DIN EN 197-1 stipulate that the principle constituents of this cement must consist of at least 80 % by mass of Portland cement clinker and no more than 20 % by mass of limestone. In practical concrete applications Portland limestone cement shows comparable performance with Portland cement with respect to the workability and strength development of the concrete produced from it. However, it is important to ensure that the durability of the concrete made with a CEM II/A-L cement is also comparable.

The important technical properties of CEM II/A-L 32.5 R cements and corresponding CEM I 32.5 R cements have been compared on the basis of the test results which were obtained during the tests for building inspectorate approval of Portland limestone cements in Germany carried out on ten cements from different manufacturing plants. This covers not only the strength developments of the cement and concrete but also the progress of carbonation and the resistance to freeze-thaw and to freeze-thaw with de-icing salt as durability characteristics.

As is shown by the results, Portland limestone cement performance in concrete does not exhibit any appreciable differences from the performance of Portland cement. This justifies the equal ranking of these two types of cement in the body of legislation dealing with practical construction applications, such as DIN 1045 Beton und Stahlbeton (Concrete and Reinforced Concrete).

### 1 Ausgangslage

In Übereinstimmung mit dem Entwurf einer europäischen Zementnorm E DIN EN 197-1 [1] benennt die mit Ausgabe Oktober 1994 vollständig überarbeitete deutsche Zementnorm DIN 1164-1 [2] die zur Zementherstellung als Hauptbestandteile zugelassenen hydraulischen, latent-hydraulischen, puzzolanischen oder inerten Zementbestandteile und legt für diese Stoffe Anforderungen fest. Durch die in dieser Norm vorgenommene, durch Kurzzeichen gekennzeichnete Definition der Zementarten werden für jede Zementart obere und untere Mengenbegrenzungen für die jeweiligen Haupt- und Nebenbestandteile festgeschrieben. Mit der Möglichkeit, Normzemente aus unterschiedlichen Hauptbestandteilen innerhalb vorgegebener Mengenbeschränkungen zusammenzusetzen, wird der Notwendigkeit Rechnung getragen, die für die Zementanwendung maßgeblichen Merkmale gezielt und wenn erforderlich, differenziert zu verwirklichen. Die breiten Anwendungsmöglichkeiten von Zement in Mörtel und Beton fordern Ze-

### 1 Original situation

In conformity with the draft of European cement standard E DIN EN 197-1 [1] the completely revised German cement standard DIN 1164-1 [2] issued in October 1994 lists the hydraulic, latent-hydraulic, pozzolanic or inert cement constituents approved as main constituents for cement manufacture and specifies requirements for these substances. The definitions of the cement types, characterized by notations, provided in this standard stipulate upper and lower limits for the quantities of the respective main and secondary constituents for each type of cement. Where standard cements can be made up from different main constituents within given limits it is recognized that the features essential to the cement application need to be achieved selectively and, where necessary, discriminately. The wide range of possible applications of cement in mortar and concrete require cements with very different working properties – from, for example, high early strength cements for industrial manufacture of precast elements and concrete products to

mente mit sehr unterschiedlichen Verarbeitungsmerkmalen – von beispielsweise früh hochfesten Zementen für die industrielle Werkfertigung von Fertigteilen und Betonwaren bis hin zu langsam mit geringer Hydratationswärmeabgabe erhärtenden Zementen für massive, großflächige Bauteile.

Während der Einfluß der Zemente auf die Betonfestigkeit – und wenn erforderlich, auch auf die Festigkeitsentwicklung – sowie auf die für die Verarbeitung maßgeblichen Frischbetoneigenschaften wie Konsistenz- bzw. Verdichtungsmaß, Zusammenhalteeigenschaften, durch Eignungsprüfungen an der baupraktisch vorgesehenen Mörtel- oder Betonzusammensetzung geprüft werden kann und auf dieser Grundlage die Eignung des Zements für die vorgesehene Beton- oder Mörtelsorte bzw. für die baupraktische Aufgabe bewertet werden kann, entziehen sich die für die Dauerhaftigkeit unter den jeweils gegebenen klimatischen Bedingungen erforderlichen Zementeigenschaften einer vergleichbar unmittelbaren Bewertung. Bei Neuentwicklungen von Zementen mit wenig erprobten stofflichen und mengenmäßigen Zusammensetzungen muß deshalb neben der Festigkeitsentwicklung überprüft werden, ob auch die für die Dauerhaftigkeit von Beton maßgeblichen Anforderungen an die Zementeigenschaften erfüllt werden. Wegen der in der Regel nicht vorhandenen Langzeiterfahrungen mit neuen Zementen kann diese Prüfung nur auf der Grundlage von Laboruntersuchungen erfolgen, deren Ergebnisse durch Vergleich mit entsprechenden Ergebnissen langzeiterprobter Zemente zu bewerten sind.

Da Zement für die Gebrauchstauglichkeit und Standfestigkeit daraus hergestellter Mörtel und Betone eine große Bedeutung hat, werden neue Zementarten nach ihrer Entwicklung i.d.R. nicht unmittelbar genormt, sondern bedürfen zur baupraktischen Erprobung erst einmal einer allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung. Diese wird nur auf der Grundlage umfangreicher, erfolgreich bestandener Prüfungen erteilt. Erst nach einer angemessen langen Erprobungszeit werden bei Bedarf bauaufsichtlich zugelassene Zemente in die Norm übernommen. Dies geschah für Portlandkalksteinzemente CEM II/A-L erstmals bei der als Ausgabe Oktober 1994 vorliegenden Gesamtüberarbeitung von DIN 1164-1. Dieser Übernahme als Normzement ging eine mehr als zehnjährige baupraktische Erprobung voraus.

## 2 Portlandkalksteinzemente

Die in DIN 1164-1 [Oktober 1994] genormten Portlandkalksteinzemente CEM II/A-L unterscheiden sich nur in den Hauptbestandteilen von Portlandzement CEM I. Der Gehalt an Portlandzementklinker muß wenigstens 80 M.-%, und der Gehalt an Kalkstein darf höchstens 20 M.-%, bezogen auf die Summe der Haupt- und Nebenbestandteile, betragen. Dabei darf nur hochwertiger Kalkstein nach DIN 1164-1 verwendet werden. Die notwendige hohe Qualität des Kalksteins wird in DIN 1164-1 durch die Erfüllung von 3 Kriterien sichergestellt: Erstens durch einen hohen Gehalt an Calciumcarbonat im Kalkstein, er muß  $\geq 75$  M.-% betragen, zweitens durch einen niedrigen Gehalt an organischen Verunreinigungen – der Gehalt an organischem Kohlenstoff, der sog. TOC-Wert, darf 0,20 M.-% nicht überschreiten – und drittens durch einen niedrigen Tongehalt im Kalkstein, der – gemessen als Methylenblau-Adsorption – 1,20 g/100 g Zement nicht überschreiten darf.

Mit der Entwicklung von Portlandkalksteinzementen CEM II/A-L mit bis zu maximal 20 M.-% hochwertigem Kalkstein folgten die Zementhersteller das Ziel, einen den erprobten Portlandzementen ebenbürtigen Zement zur Seite zu stellen. Betone aus Portlandkalksteinzement CEM II/A – L müssen vergleichbare, d.h. im Mittel in etwa gleiche Festbetoneigenschaften besitzen und ein unempfindliches Frischbetonverhalten aufweisen. Portlandkalksteinzemente eignen sich dazu besonders.

Der einer bauaufsichtlichen Zulassung zugrunde liegende, vom Deutschen Institut für Bautechnik [DIBT] auf Empfehlung des zuständigen Sachverständigenausschusses erstmals im April 1984 herausgegebene Prüfplan [3] umfaßt für Portlandkalksteinzemente chemisch-mineralogische Untersuchungen am Kalkstein und am Zement sowie die in DIN 1164-1 vorgeschriebenen Normprüfungen am Zement. Daneben sind umfangreiche Prüfungen zur Bestimmung der Frischbetoneigenschaften sowie der Festigkeitsent-

wicklungen bei Zementen, die langsam mit geringer Wärmeabgabe erhärten, für massive Bauteile, die über große Flächen ausgedehnt sind.

Performance tests on the mortar or concrete composition intended for a particular construction task can be used to test the influence of the cements on the concrete strength – and, if necessary, also on the strength development – as well as on the fresh concrete properties which govern workability, such as consistency or degree of compaction and cohesive ability. On this basis it is possible to evaluate the suitability of the cement for the intended types of concrete or mortar and for the construction task, but there is no comparable direct evaluation available for the cement properties required to achieve durability under the particular climatic conditions. With newly developed cements with compositions for which there has been little testing of materials and quantities it is therefore necessary, in addition to the strength development, to check whether the requirements for the cement properties which govern the durability of concrete are also fulfilled. Because long-term experience is not as a rule available with new cements this testing can only be carried out on the basis of laboratory investigations, the results of which have to be evaluated by comparison with corresponding results from cements which have been submitted to long-term testing.

Cement is very important for the serviceability and stability of the mortars and concretes produced from it, so new types of cement are not normally standardized immediately after their development. They first require general building inspectorate approval for testing under practical construction conditions. This is only awarded after they have successfully passed extensive tests. Cements which have had building inspectorate approval will only, on request, be adopted into the standard after a suitably long trial period. For CEM II/A-L Portland limestone cements this first occurred with the complete revision of DIN 1164-1 issued in October 1994. This adoption as a standard cement was preceded by more than ten years of testing under practical construction conditions.

## 2 Portland limestone cements

The CEM II/A-L Portland limestone cements standardized in DIN 1164-1 [October 1994] differ from CEM I Portland cement only in the main constituents. The content of Portland cement clinker must be at least 80 % by mass, and the content of limestone must not exceed 20 % by mass, relative to the total of main and secondary constituents. Only high-grade limestone as defined in DIN 1164-1 shall be used. Three criteria have to be fulfilled in DIN 1164-1 to ensure the necessary high quality of the limestone: firstly a high content of calcium carbonate in the limestone (it must be  $\geq 75$  % by mass), secondly a low content of organic impurities (the content of organic carbon, the TOC value, shall not exceed 0.20 % by mass), and thirdly a low clay content in the limestone (which shall not exceed 1.20 g/100 g cement, measured as methylene blue adsorption).

When they developed CEM II/A-L Portland limestone cements with up to a maximum of 20 % by mass of high-grade limestone the cement manufacturers were aiming at a cement which could be compared on equal terms with the proven Portland cements. Concretes made with CEM II/A-L Portland limestone cements must have comparable, i.e. on average approximately the same, solid concrete properties and exhibit robust fresh concrete characteristics. Portland limestone cements are particularly suitable for this purpose.

The test schedule [3], which was issued for the first time in April 1984 by the DIBT (German Institute for Construction Technology) at the recommendation of the responsible committee of experts and on which building inspectorate approval is based, comprises, for Portland limestone cements, chemical and mineralogical investigations of the limestone and cement as well as the standard tests on the cement stipulated in DIN 1164-1. Extensive tests also have to be carried out to determine the fresh concrete properties and the strength development. Of particular importance is the assessment of the durability characteristics of concretes made with Portland limestone cement which cannot be determined directly by practical suitability tests. For this purpose investigations were carried out into the resistance to carbonation and the resistance to

wicklung durchzuführen. Von besonderer Bedeutung ist die Beurteilung der durch baupraktische Eignungsprüfungen nicht unmittelbar bestimmbar dauerhaften Merkmale von Betonen aus Portlandkalksteinzement. Hierzu wurden Untersuchungen zum Carbonatisierungswiderstand sowie zum Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand durchgeführt. Damit sollte gezeigt werden, daß Betone aus Portlandkalksteinzement einen ausreichenden Widerstand auch gegenüber einem sehr starken Frost-Tausalz-Angriff im Sinn von DIN 1045 7.88 [4] aufweisen, wie er z.B. bei Betonfahrbahnen auftreten kann.

Mit der Entwicklung und Markteinführung von Portlandkalksteinzementen mit Leistungsmerkmalen ähnlich denen der Portlandzemente trägt die Zementindustrie auch zur Klimavorsorge bei. Der mit der Herstellung von Zement verbundene Energieeinsatz und die dabei freigesetzte Menge an CO<sub>2</sub> resultiert überwiegend aus dem Klinkerbrennprozeß. Durch teilweisen Austausch des Portlandzementklinkers gegen hochwertigen Kalkstein wird Energie gespart und die CO<sub>2</sub>-Emission gemindert. Im Mittel beträgt der Gesamtenergieaufwand zur Herstellung von Portlandkalksteinzementen etwa 90 % des entsprechenden Aufwands zur Herstellung von Portlandzementen, und die CO<sub>2</sub>-Emissionen können um bis zu 15 % gesenkt werden [5].

Zum besseren Verständnis der baupraktischen Eigenschaften von Portlandkalksteinzementen werden in diesem Beitrag die Ergebnisse umfangreicher Zulassungsprüfungen zusammengestellt, die in den 80er Jahren an der Amtlichen Materialprüfungsanstalt für das Bauwesen beim Institut für Baustoffkunde und Materialprüfung der Universität Hannover und an der Forschungs- und Materialprüfungsanstalt Baden-Württemberg – Otto-Graf-Institut – im Auftrag der die Zulassung beantragenden Zementhersteller an Portlandkalksteinzementen der Festigkeitsklasse 32,5 R (CEM II/A-L 32,5 R) durchgeführt wurden.

### 3 Durchgeführte Prüfungen

#### 3.1 Zusammensetzung der untersuchten Portlandkalksteinzemente

Zulassungsprüfungen für Zemente werden an Zementproben aus sogenannten Probemahlungen durchgeführt. Die Zusammensetzungen von Probemahlungen werden so festgelegt, daß für die jeweils betrachteten Eigenschaften diejenige gewählt wird, die für die zu prüfende Eigenschaft am ungünstigsten erscheint. Alle hier berichteten Mörtel- und Betonmischungen wurden mit Portlandkalksteinzementen hergestellt, die bei der Probemahlung einem Gehalt an Kalkstein am oberen zulässigen Grenzwert für CEM II/A-L von 20 M.-% am nächsten kamen. In der Produktion muß ein Abstand von diesem Grenzwert eingehalten werden, d.h. der Gehalt an Kalkstein muß so gewählt werden, daß mit ausreichender Sicherheit der Grenzwert unter Produktionsbedingungen an jeder Einzelprobe nicht erreicht wird (siehe E DIN EN 197-1).

#### 3.2 Umfang der Prüfungen

Die im folgenden dargestellten Prüfungen wurden an Probekörpern mit Portlandkalksteinzementen der Festigkeitsklasse 32,5 R aus zehn Herstellwerken durchgeführt. Zur Beurteilung der beton-technologischen Eignung wurde eine vergleichende Auswertung des Einflusses von Portlandkalksteinzementen und Portlandzementen auf die Festigkeitsentwicklung, auf das Verformungsverhalten sowie auf das für die zur Dauerhaftigkeit maßgebliche Verhalten im Hinblick auf den Schutz der Korrosion von Stahl in Beton und auf den Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand vorgenommen. Im einzelnen wurden folgende Eigenschaften näher untersucht:

- Festigkeitsprüfungen am Zementmörtel über eine Zeit von bis zu 180 Tagen nach DIN EN 196-1 [6]
- Druckfestigkeiten an Betonen mit zwei unterschiedlichen Zusammensetzungen nach DIN 1048-1 [7]
- Statische Elastizitätsmoduln an Betonen mit zwei unterschiedlichen Zusammensetzungen nach DIN 1048-1
- Carbonatisierung an Betonen mit zwei unterschiedlichen Zusammensetzungen über einen Zeitraum von fünf Jahren mit Hilfe des Phenolphthaleintests [8]

freeze-thaw and to freeze-thaw with de-icing salt. The intention was to show that concretes made with Portland limestone cement exhibit adequate resistance for the purposes of DIN 1045 7.88 [4], even to very severe attack by freeze-thaw with de-icing salt such as can occur in concrete pavements.

By developing and marketing Portland limestone cements with performance features similar to those of Portland cements the cement industry is also helping to prevent climatic problems. The use of energy associated with the production of cement and the quantities of CO<sub>2</sub> which are liberated come predominantly from the clinker burning process. Partial replacement of the Portland cement clinker by high-grade limestone saves energy and reduces CO<sub>2</sub> emissions. On average, the total energy expenditure for producing Portland limestone cements amounts to about 90 % of the corresponding expenditure for producing Portland cements, and the CO<sub>2</sub> emissions can be lowered by up to 15 % [5].

For better understanding of the practical properties of Portland limestone cements this article has compiled the results of extensive approval tests which were carried out in the 80s on Portland limestone cements of the 32,5 R strength class (CEM II/A-L) in the Official Materials Testing Laboratory for Civil Engineering at the Institute for Building Materials Science and Materials Testing of the University of Hanover and in the Baden-Württemberg Research and Materials Testing Laboratory – Otto-Graf Institute – at the request of the cement manufacturers applying for approval.

### 3 Tests carried out

#### 3.1 Composition of the Portland limestone cements investigated

Approval tests for cements are carried out on cement samples from sample grinding batches. The compositions of sample grinding batches are defined so that those compositions which appear least favourable for the property to be tested are chosen for the particular properties under consideration. All the mortar and concrete mixes covered by this report were produced with Portland limestone cements which came closest in the sample grinding to a limestone content of 20 % by mass at the upper permissible limit for CEM II/A-L. During production it is necessary to maintain a safety margin from this limit, i.e. the content of limestone must be chosen to ensure with sufficient confidence that no individual sample reaches this limit under production conditions (see E DIN EN 197-1).

#### 3.2 Extent of the tests

The tests described below were carried out on test pieces made with Portland limestone cements of the 32,5 R strength class from ten manufacturing plants. In order to assess their suitability from the aspect of concrete technology a comparative evaluation was carried out into the influence of Portland limestone cements and Portland cements on strength development, deformation characteristics and the behaviour with respect to corrosion protection of steel in concrete and resistance to freeze-thaw and freeze-thaw with de-icing salt which governs the durability. The following specific properties were investigated in detail:

- Strength tests of cement mortars over a period of up to 180 days as specified in DIN EN 196-1 [6]
- Compressive strengths of the concretes with two different compositions as specified in DIN 1048-1 [7]
- Static modulus of elasticity of concretes with two different compositions as specified in DIN 1048-1
- Carbonation of concretes with two different compositions over a period of five years using the phenolphthalein test [8]
- Freeze-thaw resistance of concretes up to 100 freeze-thaw cycles as specified in the test schedules for the approval testing of Portland limestone cement
- Resistance to freeze-thaw with de-icing salt of concretes up to 70 freeze-thaw cycles with de-icing salt, substantially following the procedure in ÖNORM B 3306 [9] as specified in the test schedules for approval testing of Portland limestone cement

All tests were carried out both on the Portland limestone cements requiring approval and on Portland cements, made with the clinker

- Frostwiderstand an Betonen bis zu 100 Frost-Tau-Wechseln (FTW) nach den Prüfplänen für die Zulassungsprüfung von Portlandkalksteinzement
- Frost-Tausalz-Widerstand an Betonen bis zu 70 Frost-Tausalz-Wechseln (FTW) unter weitgehender Anlehnung an die ÖNORM B 3306 [9] nach den Prüfplänen für die Zulassungsprüfung von Portlandkalksteinzement

Alle Prüfungen wurden sowohl an den zuzulassenden Portlandkalksteinzementen als auch an Portlandzementen mit dem auch im Portlandkalksteinzement verwandten Klinker als Vergleichszement durchgeführt. Jede Prüfung erfolgte an drei Probekörpern – bei Frostprüfung an zwei Probekörpern. Die in Abschnitt 4 dargestellten Ergebnisse sind Mittelwerte der Einzelprüfergebnisse.

Um sicherzustellen, daß Zulassungszemente allen Anwendungsbereichen nach DIN 1045 (7.88) genügen, wurden die zuvor genannten Eigenschaften an Betonzusammensetzungen überprüft, die nach den jeweils ungünstigsten jedoch noch zulässigen Grenzwerten für die Betonzusammensetzung ausgewählt wurden. Für die Ermittlung der Frischbetoneigenschaften sowie der Festigkeits- und Verformungskenngrößen wurden Betone gewählt, die in bezug auf Zementgehalt und Wasserzementwert im ungünstigsten Bereich liegen, den DIN 1045 (7.88) für Stahlbeton (Betonmischung 1) und Beton für Außenbauteile (Betonmischung 2) zuläßt. Dasselbe gilt für die für Stahlbeton wesentliche Eigenschaft des Korrosionsschutzes von Stahl. Diese wird an Betonen ermittelt, die über die bereits genannten Festlegungen für die Betonzusammensetzung hinaus eine feinteilreichere, schlechter verdichtbare Kornzusammensetzung des Zuschlags aufweisen. Die Zusammensetzung der Betone mit besonderen Eigenschaften, wie z.B. Beton mit hohem Frostwiderstand oder Beton mit hohem Frost-Tausalz-Widerstand, richtete sich ebenfalls nach den Mindestanforderungen der DIN 1045 (7.88) für diese Anwendungsbereiche.

### 3.3 Prüfung der Festigkeitsentwicklung des Zements nach DIN EN 196-1

Die Festigkeiten des Zements wurden an Normprismen im Alter von 2, 7, 28 sowie zusätzlich im Alter von 90 und 180 Tagen bestimmt.

### 3.4 Prüfung der Druckfestigkeit und des statischen Elastizitätsmoduls an Betonprobekörpern

Die Prüfungen nach DIN 1048-1 wurden an den Betonmischungen 1 und 2 durchgeführt.

Mischung	Zementgehalt	w/z	Zuschlag
1	240 kg/m <sup>3</sup>	0,75	Kiessand mit der Sieblinie C 32 nach DIN 1045 (12.78) [10]
2	300 kg/m <sup>3</sup>	0,60	Kiessand mit der Sieblinie A 32/B 32 nach DIN 1045 (12.78)

Die Betondruckfestigkeit an Würfeln von 150 mm Kantenlänge wurde im Alter von 2, 7, 28 und 180 Tagen geprüft. Im Prüfplan von 1984 wurden die Prüfungen nur bis zu einem Alter von 180 Tagen gefordert. In drei Fällen wurde die Betondruckfestigkeit zusätzlich im Alter von 1, 2 und 5 Jahren geprüft.

Der statische E-Modul wurde an Zylindern von 150 mm Durchmesser und 300 mm Höhe im Alter von 7 und 28 Tagen sowie 3, 6 und 12 Monaten bestimmt.

### 3.5 Prüfung der Carbonatisierung an Betonprobekörpern

Die Prüfungen wurden an den Betonmischungen 3 und 4 durchgeführt.

Mischung	Zementgehalt	w/z	Zuschlag
3	240 kg/m <sup>3</sup>	0,75	Kiessand mit der Sieblinie B 32/C 32 nach DIN 1045 (12.78)
4	300 kg/m <sup>3</sup>	0,60	Kiessand mit der Sieblinie B 32/C 32 nach DIN 1045 (12.78)

Die Carbonatisierungstiefe wurde an Balken mit den Maßen 100 mm x 100 mm x 500 mm nach 14, 28, 56, 98 und 140 Tagen

used in the Portland limestone cements, as reference cements. Each test was carried out on three test pieces – or on two test pieces for the freeze-thaw testing. The results shown in Section 4 are average values of the individual test results.

In order to ensure that approved cements satisfy all application areas as specified in DIN 1045 (7.88) the above mentioned properties were checked on concrete compositions which were chosen in each case on the basis of the least favourable, but still permissible, limits for the concrete composition. Concretes which lay in the least favourable range with respect to cement content and water cement value permitted by DIN 1045 (7.88) for reinforced concrete (concrete mix 1) and for concrete for external components (concrete mix 2) were chosen for determining the fresh concrete properties and the strength and deformation parameters. The same applies to the property of corrosion protection for steel which is essential for reinforced concrete. This was determined in concretes which, in addition to the already mentioned specifications for the concrete composition, had an aggregate particle size composition which was richer in fines and harder to compact. The compositions of the concretes with special properties, such as concrete with high freeze-thaw resistance or concrete with high resistance to freeze-thaw with de-icing salt, were also governed by the minimum requirements of DIN 1045 [7.88] for these areas of application.

### 3.3 Testing the strength development of the cement as specified in DIN EN 196-1

The strengths of the cements were determined on standard prisms at 2, 7 and 28 days and also at 90 and 180 days.

### 3.4 Testing the compressive strength and static modulus of elasticity on concrete test pieces

The tests as specified in DIN 1048-1 were carried out on the concrete mixes 1 and 2.

Mix	Cement content	w/c	Aggregate
1	240 kg/m <sup>3</sup>	0,75	coarse sand with the C 32 grading curve specified in DIN 1045 (12.78) [10]
2	300 kg/m <sup>3</sup>	0,60	coarse sand with the A 32/B 32 grading curve specified in DIN 1045 (12.78)

The concrete compressive strength was tested on cubes of 150 mm edge length at 2, 7, 28 and 180 days. The 1984 test schedule required testing only up to 180 days, but in three cases the concrete compressive strengths were also tested at 1, 2 and 5 years.

The static modulus of elasticity was determined on cylinders of 150 mm diameter and 300 mm height at 7 and 28 days as well as at 3, 6 and 12 months.

### 3.5 Testing the carbonation in concrete test pieces

The tests were carried out on concrete mixes 3 and 4.

Mix	Cement content	w/c	Aggregate
3	240 kg/m <sup>3</sup>	0,75	coarse sand with the B 32/C 32 grading curve specified in DIN 1045 (12.78)]
4	300 kg/m <sup>3</sup>	0,60	coarse sand with the B 32/C 32 grading curve specified in DIN 1045 (12.78)]

The depth of carbonation was tested on 100 mm x 100 mm x 500 mm beams after 14, 28, 56, 98 and 140 days as well as after 1, 2 and 5 years. The cross-sectional pieces which were split off were about 50 mm to 70 mm long. The carbonation was established using the phenolphthalein test, in which fresh fracture surfaces were sprayed with phenolphthalein at each test date and the average depth of carbonation for the test pieces was determined 24 hours later from the average depth of carbonation of each side.

### 3.6 Testing the freeze-thaw resistance of concrete test pieces

The cyclic freeze-thaw testing was carried out on concrete mix 5 without artificial air pores.

sowie nach 1, 2, und 5 Jahren geprüft. Die Länge der abgespaltenen Querschnittstücke betrug etwa 50 mm bis 70 mm. Die Carbonatisierung wurde mit Hilfe des Phenolphthaleintests festgestellt, wobei je Prüftermin frische Bruchflächen mit Phenolphthalein besprüht und 24 Stunden danach die mittleren Carbonatisierungstiefen für den Probekörper aus den mittleren Carbonatisierungstiefen jeder Seite bestimmt wurden.

### 3.6 Prüfung des Frost-Widerstands an Betonprobekörpern

Die Frost-Tau-Wechselprüfung (FTW) wurde an der Betonmischung 5 ohne künstliche Luftporen durchgeführt:

Mischung	Zementgehalt	w/z	Sieblinie des Zuschlags							
5	300 kg/m <sup>3</sup>	0,60	Sieb [mm]	0,25	1	2	4	8	16	32
			Durchgang [M.-%]	5	25	45	56	70	85	100

Herstellung und Lagerung der Probekörper erfolgte wie in Heft 422 des DAfStb [8] beschrieben. Die FTW-Prüfung wurde im Alter von 28 Tagen nach eintägiger Wasserlagerung begonnen. Die Probenbehälter mit den zwei 100-mm-Würfeln und dem Wasser wurden in einer Frostkammer oder Frostruhe so abgekühlt, daß die Temperatur in Würfelmitte (Ausgangstemperatur rd. +20 °C) nach 2 Stunden 0 °C (±2 K) und nach 15,5 Stunden -15 °C (±2 K) betrug. Die Abkühlung verlief zwischen +20 °C und 0 °C und zwischen 0 °C und -15 °C möglichst linear. Nach der 15,5stündigen Lagerung wurde der Probenbehälter mit den Würfeln und dem Eis 8,5 Stunden in Wasser von rd. +20 °C gelagert. Nach 10, 20, 30, 50 und 100 FTW wurden die abgefrosteten Bestandteile aus dem Probenbehälter entnommen, einen Tag bei 105 °C getrocknet und ihre Masse auf 1 g genau bestimmt. Abweichend von den oben beschriebenen Prüfintervallen wurde die Masse der abgefrosteten Bestandteile, je nach Prüfplan, auch nach 25 und 70 oder 75 FTW bestimmt. Durch das Beziehen der Masse der abgefrosteten Bestandteile auf die Masse der beiden Würfel im Alter von 27 Tagen wurde der Masseverlust ermittelt.

### 3.7 Prüfung des Frost-Tausalz-Widerstands an Betonprobekörpern

Die Frost-Tausalz-Wechselprüfung (FTsW) wurde an der Betonmischung 6 durchgeführt.

Mischung	Zementgehalt	w/z	Zuschlag
6	335 kg/m <sup>3</sup>	0,50	Kiessand mit der Sieblinie A 32/B 32 nach DIN 1045 (12.78)
LP-Gehalt im Frischbeton rd. 4,5 Vol.-% Abstandsfaktor ≤0,20 mm, Mikroluftporengehalt L300 ≥1,5 M.-%			

Als Prüffläche diente die abgezogene Oberfläche von Probekörpern mit den Maßen 200 mm x 200 mm x 80 mm. Die Prüfung begann im Alter von 56 Tagen. Die zu prüfende Oberfläche wurde vor Beginn der Prüfung mit einer 15 mm hohen Randeinfassung versehen. Etwa 8 Stunden vor Frostbeginn wurde eine 3%ige NaCl-Lösung in einer Schichtdicke von 4 mm bis 5 mm auf die waagrecht eingerichtete Prüffläche gegossen. Die Prüfung selbst bestand aus 70 FTW, wobei während der ganzen Prüfdauer die 3%ige NaCl-Lösung auf der waagrecht eingerichteten Prüffläche stand. Ein FTsW bestand aus 16 Stunden Frost- und 8 Stunden Taulagerung.

Bei der Frostphase mußte die mit der NaCl-Lösung bedeckte Betonoberfläche 4 bis 7 Stunden nach Beginn der Frostlagerung eine Temperatur von -18 °C erreichen oder unterschreiten. Ab diesem Zeitpunkt mußte die Lufttemperatur in der Frostanlage -20 °C bis -22 °C betragen. Bei der Tauphase mußte die mit der NaCl-Lösung bedeckte Betonoberfläche 2 bis 5 Stunden nach Beginn der Taulagerung eine Temperatur von mindestens +15 °C aufweisen.

Bis zum Jahr 1986 wurden alle abgewitterten Anteile nach 7, 14, 21, 42 und 70 FTsW mit der NaCl-Lösung von den Platten abgegossen, gesammelt, nach Abgießen der überstehenden NaCl-Lösung bei 105 °C getrocknet und auf 0,1 g genau gewogen. Ab dem Jahr 1987 wurde die Masse der abgewitterten Teile nach 5, 15,

Mix	Cement content	w/c	Aggregate grading curve							
			sieve [mm]	0,25	1	2	4	8	16	32
5	300 kg/m <sup>3</sup>	0,60	material passing [M.-%]	5	25	45	56	70	85	100

The test pieces were produced and stored as described in Vol. 422 of the DAfStb [8]. The cyclic freeze-thaw testing was started at 28 days after one day's storage in water. The sample container with the two 100 mm cubes and the water was cooled in a frost chamber or frost chest so that the temperature in the centre of the cube (initial temperature about +20 °C) after 2 hours was 0 °C (±2 K) and after 15.5 hrs was -15 °C (±2 K). The cooling between +20 °C and between 0 °C, and between 0 °C and -15 °C, took place as linearly as possible. After the 15.5 hours storage the sample container with the cubes and the ice was stored for 8.5 hours in water at about +20 °C. After 10, 20, 30, 50 and 100 freeze-thaw cycles the pieces lost by frost erosion were taken from the sample container, dried for one day at 105 °C, and their mass measured to the nearest 1 g. As a departure from the test intervals described above the mass of the pieces lost by frost erosion was, depending on the test schedule, also determined after 25 and 70 or 75 freeze-thaw cycles. The mass loss was determined by relating the mass of the pieces lost by frost erosion to the mass of the two cubes at 27 days.

### 3.7 Testing the resistance to freeze-thaw with de-icing salt of concrete test pieces

The cyclic freeze-thaw testing with de-icing salt was carried out on concrete mix 6.

Mix	cement content	w/c	Aggregate
6	335 kg/m <sup>3</sup>	0,50	course sand with the A 32/B 32 grading curve specified in DIN 1045 (12.78)
air void content in fresh concrete approx. 4.5 Vol.-% spacing factor ≤0,20 mm, L300 micro air void content ≥ 1,5% by mass			

The test surfaces were the cleared surfaces of 200 mm x 200 mm x 80 mm test pieces. The testing began at 56 days. Before the start of testing the surfaces to be tested were provided with a 15 mm high edge surround. About 8 hours before the start of freezing a 3 % NaCl solution was poured on to the horizontal test surface to a depth of 4 mm to 5 mm. The test itself consisted of 70 freeze-thaw cycles with de-icing salt during which the horizontal test surface was covered for the whole period of the test with 3 % NaCl solution. One freeze-thaw cycle with de-icing salt consisted of 16 hours of storage under freezing conditions and 8 hours storage under thawing conditions.

During the freezing phase the concrete surface covered with NaCl solution had to reach or fall below a temperature of -18 °C between 4 and 7 hours after the start of the freezing storage. From this time the air temperature in the freezing unit had to be -20 °C

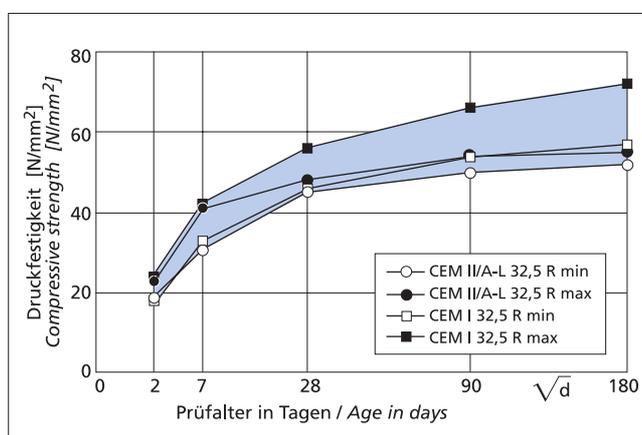


Bild 1: Druckfestigkeitsentwicklung des Zements, geprüft nach DIN EN 196-1

Fig. 1: Compressive strength development of cement tested in accordance with DIN EN 196-1

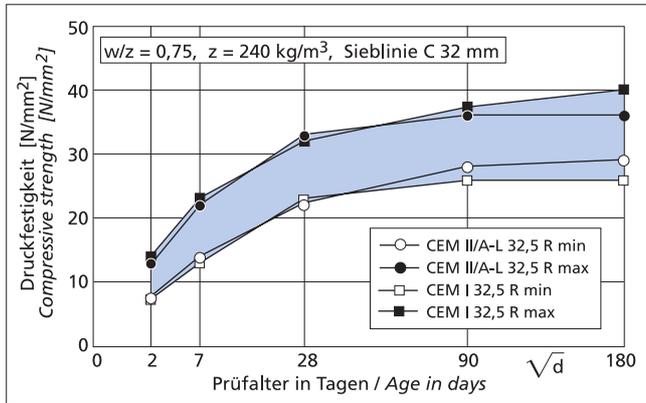


Bild 2: Druckfestigkeitsentwicklung des Betons, geprüft an der Mischung 1

Fig. 2: Compressive strength development of concrete tested on Mix 1

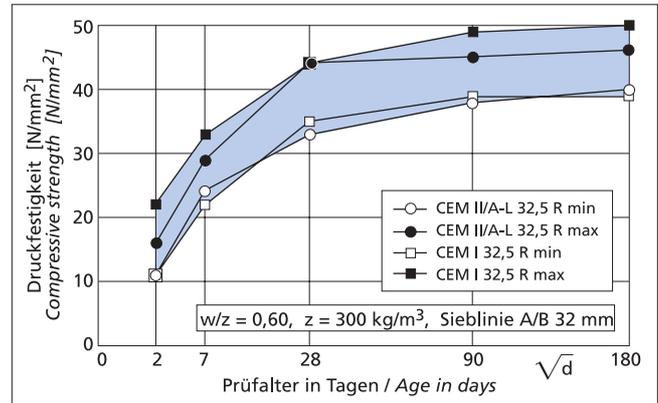


Bild 3: Druckfestigkeitsentwicklung des Betons, geprüft an der Mischung 2

Fig. 3: Compressive strength development of concrete tested on Mix 2

25, 50 und 70 FTW bestimmt. Die Masseverluste wurden jeweils als Mittelwerte der drei untersuchten Probekörper angegeben. Die Beurteilung des Frost-Tausalz-Widerstands erfolgte nach der abgewitterten Masse und nach einer augenscheinlichen Beurteilung der Oberfläche.

#### 4 Darstellung und Bewertung der Ergebnisse<sup>1)</sup>

##### 4.1 Darstellung der Ergebnisse in den Abbildungen

Die einzelnen Darstellungen zeigen die jeweiligen Ergebnisse als Mittelwert der Einzelprüfungen sowohl für die geprüften Portlandkalksteinzemente als auch für die parallel dazu geprüften Portlandzemente. Die Darstellung der Ergebnisse in den Abbildungen ist so gewählt, daß jeweils der Minimalwert und der Maximalwert für die beiden Zementarten wiedergegeben wird. Der sich überschneidende Bereich ist dunkler hinterlegt.

##### 4.2 Festigkeiten der Zemente

Die Ergebnisse der Festigkeitsprüfungen an Normprismen nach 2, 7, 28, 90 und 180 Tagen sind in Bild 1 dargestellt.

Die Bandbreite der Anfangsfestigkeit ist bei beiden Zementen gleich. Dies gilt in etwa auch für die Minimalwerte der Normfestigkeit und des Nacherhärtungsverlaufs über 28 Tage hinaus. Die Normfestigkeiten sowie die maximal erreichten Festigkeiten nach 90 und 180 Tagen liegen bei den Portlandzementen in der Tendenz höher als bei den Portlandkalksteinzementen. Der breitere Streubereich der Festigkeitsentwicklung von Portlandzementen wird auch dadurch deutlich, daß die Normfestigkeit von zwei Portlandzementen oberhalb des als 90%-Fraktile in DIN 1164-1 definierten oberen Grenzwertes liegt.

##### 4.3 Betondruckfestigkeit

Die Ergebnisse der Betondruckfestigkeitsprüfungen nach 2, 7, 28, 90 und 180 Tagen sind in den Bildern 2 und 3 dargestellt.

Die in der Baupraxis durch Eignungsprüfungen für die Betonzusammensetzung zu bestimmende charakteristische Betondruckfestigkeit und auch die Festigkeitsentwicklung liegen für beide Zemente und für beide Betonzusammensetzungen in engen Bereichen. Der in diesen Untersuchungen festgestellte Unterschied im Festigkeitsverlauf der Portlandzement- bzw. Portlandkalksteinzementbetone ist aus baupraktischer Sicht unbedeutend.

Die Anforderungen der DIN 1045 (7.88) an einen Beton der Festigkeitsklasse B 15 bzw. B 25 hinsichtlich der Druckfestigkeit sind für die Betonmischung 1 und 2 beispielsweise gleichermaßen erfüllt.

Die Festigkeitsentwicklung im jungen Alter verläuft normal, legt man den Umrechnungswert nach DIN 1045 (7.88) von 1,2  $\beta_{w7}$  von der 7- auf die 28-Tage-Festigkeit zugrunde. Die Prüfwerte liegen erwartungsgemäß im allgemeinen über den Rechen-

to -22 °C. During the thawing phase the concrete surface covered with NaCl solution had to have a temperature of at least +15 °C between 2 and 5 hours after the start of the thawing storage.

Up to 1986 all the pieces lost by frost erosion after 7, 14, 21, 42 and 70 freeze-thaw cycles with de-icing salt were poured off from the slabs together with the NaCl solution, collected, dried at 105 °C after pouring off the supernatant NaCl solution, and weighed to the nearest 0.1 g. After 1987 the mass of the eroded pieces was determined after 5, 15, 25, 50 and 70 freeze-thaw cycles with de-icing salt. In each case the mass losses were given as the average of the three test pieces investigated. Assessment of the resistance to freeze-thaw with de-icing salt was carried out on the basis of the mass lost by erosion and a visual assessment of the surface.

#### 4 Representation and evaluation of the results<sup>1)</sup>

##### 4.1 Representation of the results in the diagrams

The individual representations show the relevant results as the average value of the individual tests both for the Portland limestone cements tested and for the Portland cements tested at the same time. The representation of the results in the diagrams has been chosen so that in each case the minimum values and maximum values are shown for the two types of cement. The overlapping area has been shaded.

##### 4.2 Strengths of the cements

The results of the strength tests on standard prisms after 2, 7, 28, 90 and 180 days are shown in Figure 1.

The band widths for the initial strength are the same for the two cements. The same is also approximately true for the minimum values of the standard strength and the secondary hardening behaviour after 28 days. The standard strengths as well as the maximum strengths reached after 90 and 180 days tend to be higher for the Portland cements than for the Portland limestone cements. The wider range of spread of the strength development of Portland cements also becomes obvious in that the standard strengths of two Portland cements lie above the upper limit defined in DIN 1164-1 as the 90 % fractile.

##### 4.3 Concrete compressive strength

The results of the concrete compressive strength tests after 2, 7, 28, 90 and 180 days are shown in Figures 2 and 3.

The characteristic concrete compressive strength and the strength development which, in construction practice, have to be tested by suitability tests for the concrete composition lie in narrow ranges for both cements and for both concrete compositions. The differences in strength behaviour of the Portland cement concretes and Portland limestone cement concretes established in these in-

<sup>1)</sup> Die in Tabellenform zusammengestellten Ergebnisse aller Prüfungen können über das Forschungsinstitut der Zementindustrie, Hauptabteilung Betontechnik, Postfach 30 10 63, 40410 Düsseldorf, bezogen werden.

<sup>1)</sup> The results of all tests listed in tabular form can be obtained through the Research Institute of the Cement Industry, Hauptabteilung Betontechnik, Postfach 30 10 63, 40410 Düsseldorf.

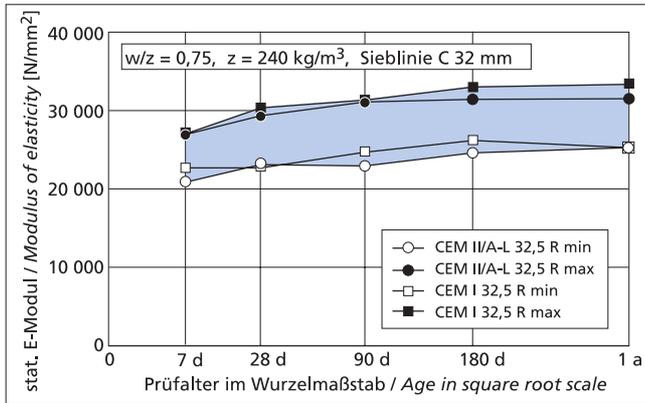


Bild 4: Statischer E-Modul des Betons, geprüft an der Mischung 1  
Fig. 4: Static modulus of elasticity of concrete tested on Mix 1

werten. Auch die Nacherhärtung des Betons bewegt sich in durch- aus üblichem Rahmen.

#### 4.4 Statischer E-Modul

Die Ergebnisse der Prüfung des statischen E-Moduls nach 7, 28, 90, 180 und 360 Tagen sind in den Bildern 4 und 5 dargestellt.

Die Streubereiche der Meßergebnisse für den Elastizitätsmodul der Betone beider Zementarten sind für beide Betone nahezu deckungsgleich. Zwischen beiden Zementarten ist kein nennens- werter Unterschied erkennbar. Absolut lagen die Werte im Alter von 90 Tagen für Mischung 1 bei rd. 29 000 N/mm<sup>2</sup> und für Mi- schung 2 bei rd. 30 000 N/mm<sup>2</sup>.

#### 4.5 Carbonatisierung

Die Ergebnisse der Prüfung des Carbonatisierungsfortschritts nach 14, 28, 56, 98, 140 Tagen sowie nach 1, 2, und 5 Jahren sind für die Prüfungen am Beton in den Bildern 6 und 7 dargestellt.

Erwartungsgemäß erreichen die Carbonatisierungstiefen im Beton der Mischung 3 mit  $w/z = 0,75$  höhere Werte als die im Beton der Mischung 4 mit  $w/z = 0,60$ . Bis zu einem Jahr Prüfdauer sind die Streubereiche nahezu deckungsgleich, im weiteren Verlauf tritt für die Portlandkalksteinzemente eine geringe Verschiebung zu höheren Werten hin auf. Diese Tendenz zeigte sich auch bei einer Untersuchung von Krell und Wischers über den Austausch von Zement gegen Kalksteinmehl [11].

Die geringen Unterschiede im Carbonatisierungsfortschritt unter Laborbedingungen lassen im Bauwerk unter realen Feuchtebe- dingungen keinen systematischen Unterschied im Carbonatisie- rungsverhalten der Bauteile erwarten. Grundsätzlich sind Stahlbe- tonbauteile, wie z.B. Außenbauteile bei regengeschützter Lage- rung im Freien, deren Bewehrung infolge Carbonatisierung des Betons korrodieren kann, durch eine entsprechende Betondeckung zu schützen. Dazu wird in DIN 1045 (7.88) eine ausreichend dicke und dichte Betondeckung gefordert. Wie ein Vergleich der Bilder 6 und 7 zeigt, wird durch eine Verbesserung der Dichtheit infolge der geringeren Kapillarporosität von Betonen mit kleinerem  $w/z$ -Wert der Carbonatisierungsfortschritt maßgeblich gebremst. Die auftretenden Streuungen im Carbonatisierungsverhalten, wie sie in den Bildern 6 und 7 gezeigt sind, haben für die Praxis eine untergeordnete Bedeutung und werden durch die in DIN 1045 (7.88) geforderten Anforderungen an die Betondeckung sicher abgedeckt.

#### 4.6 Frost-Widerstand

Die Ergebnisse der Frostwiderstandsprüfungen nach 10, 20, 25, 30, 50 und 100 Frost-Tau-Wechseln sind in Bild 8 dargestellt.

Beide Zementarten weisen gemäß den in [12] angegebenen Grenzwerten einen hohen Widerstand gegen starken Frostangriff auf. Danach soll der Gewichtsverlust nach 50 Frost-Tau-Wechseln 5 M.-% und nach 100 Frost-Tau-Wechseln 10 M.-% nicht über- schreiten. Die Ergebnisse zeigen jeweils deutlich geringere Ab- frostungen. Bei Berücksichtigung der Versuchsstreuungen des

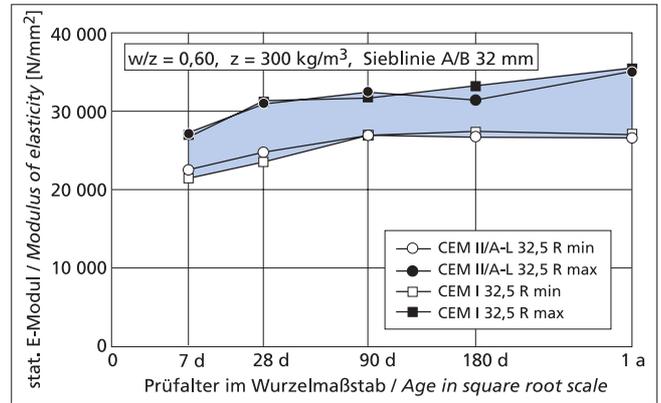


Bild 5: Statischer E-Modul des Betons, geprüft an der Mischung 2  
Fig. 5: Static modulus of elasticity of concrete tested on Mix 2

vestigations are insignificant from the practical construction point of view.

Concrete mixes 1 and 2 fulfil the respective compressive strength requirements of DIN 1045 (7.88) for concrete of the B 15 and B 25 strength classes.

The early strength development shows the normal behaviour pat- terns based on the conversion coefficient given in DIN 1045 (7.88) of 1.2  $\beta_{w7}$  from the 7 to the 28 day strength. As expected the test values are generally higher than the calculated values. The secondary hardening of the concrete also lies within entirely normal limits.

#### 4.4 Static modulus of elasticity

The results of the test of the static modulus of elasticity after 7, 28, 90, 180 and 360 days are shown in Figures 4 and 5.

The spread of results for the modulus of elasticity of the concretes made with the two types of cement are virtually identical for the two concretes. No appreciable difference can be detected between the two types of cement. In absolute terms the values at 90 days were about 29 000 N/mm<sup>2</sup> for mix 1 and about 30 000 N/mm<sup>2</sup> for mix 2.

#### 4.5 Carbonation

The results of the test of the progress of carbonation after 14, 28, 56, 98, and 140 days and after 1, 2, and 5 years are shown in Fig- ures 6 and 7 for the tests on the concrete.

As expected, the depths of carbonation in the concrete of mix 3 with  $w/c = 0,75$  reached higher values than those in the concrete of mix 4 with  $w/c = 0,60$ . Up to a test period of one year the ranges of scatter were virtually identical, after this there was a slight move- ment towards higher values for the Portland limestone cements. This trend was also apparent in an investigation by Krell and Wis- chers into the replacement of cement by limestone [11].

The small differences in progress of carbonation under labora- tory conditions mean that no systematic differences in carbonati- on behaviour of the components can be expected in structures under real moisture conditions. Basically, reinforced concrete compon- ents, such as external components in outdoor, rain-protected stor- age, with reinforcement which can become corroded as a result of carbonation of the concrete, should be protected by an appropriate concrete cover. DIN 1045 (7.88) requires a concrete cover which is sufficiently thick and dense for this purpose. Comparison of Fig- ures 6 and 7 shows that the progress of carbonation is significantly retarded by an improvement in the impermeability due to the lower capillary porosity of concretes with lower  $w/c$  value. The spread of results which occurs in the carbonation behaviour, as shown in Fig- ures 6 and 7, is of secondary practical importance and is safely dealt with by the requirements for concrete cover demanded in DIN 1045 (7.88).

#### 4.6 Freeze-thaw resistance

The results of the freeze-thaw resistance tests after 10, 20, 25, 30, 50 and 100 freeze-thaw cycles are shown in Figure 8.

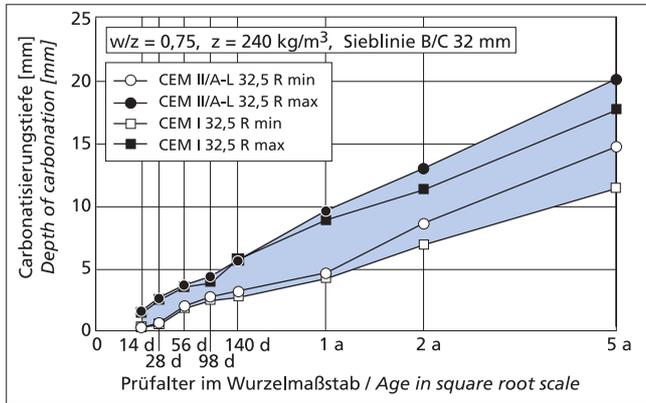


Bild 6: Carbonatisierungstiefen in Beton, geprüft an der Mischung 3  
Fig. 6: Depth of carbonation in concrete tested on Mix 3

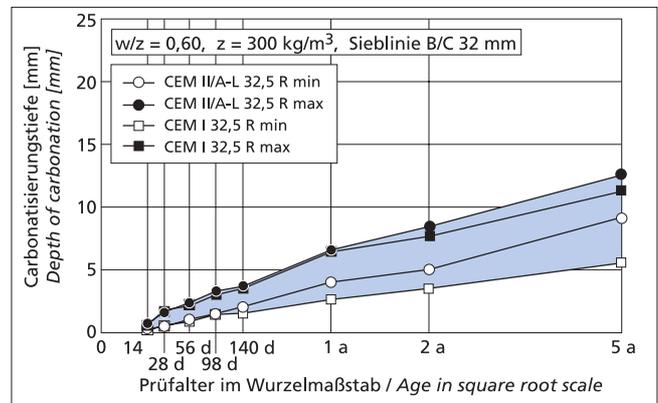


Bild 7: Carbonatisierungstiefen in Beton, geprüft an der Mischung 4  
Fig. 7: Depth of carbonation in concrete tested on Mix 4

Prüfverfahrens kann festgestellt werden, daß kein nennenswerter Unterschied im Verhalten der beiden Zementarten besteht.

#### 4.7 Frost-Tausalz-Widerstand

Die Ergebnisse der Frost-Tausalz-Prüfungen sind in Bild 9 dargestellt. Für beide Zementarten liegen die Maximalwerte der Abfröstungen im Bereich des hohen Widerstandes gegen starken Frost-Tausalz-Angriff. Der Streubereich für beide Zementarten ist nahezu deckungsgleich. Der im Bild angegebene Grenzwert wurde aus der gesicherten Kenntnis gewählt, daß Luftporenbetone aus Portlandzement bei vorschriftsmäßiger Zusammensetzung und Herstellung einen hohen Widerstand gegen starken Frost-Tausalz-Angriff aufweisen. Anhand dieser Überlegung wurden entsprechende Beurteilungskriterien durch den Sachverständigenausschuß Betontechnologie des Deutschen Instituts für Bautechnik, Berlin, für den Fall festgelegt, daß wenn ein nicht genormter Zement für den Anwendungsbereich eines Betons mit hohem Frost-Tausalz-Widerstand zugelassen werden soll.

#### 5 Zusammenfassung

Portlandkalksteinzemente mit bis zu 20 % hochwertigem Kalkstein nach DIN 1164-1 wurden im Laufe der 80er Jahre von den Zementherstellern entwickelt und nach umfangreichen Zulassungsprüfungen als bauaufsichtlich zugelassene Zemente am Markt eingeführt. Nach über zehnjähriger baupraktischer Erprobung im Hoch- und Ingenieurbau wurden sie 1994 als genormte Zemente in DIN 1164-1 übernommen. Auf der Grundlage der in den Zulassungsprüfungen gewonnenen Erkenntnisse und der in der baupraktischen Anwendung gesammelten Erfahrung beschloß der zuständige Normenausschuß im NABau, Portlandkalksteinzemente wie Portland-

Based on the limits specified in [12] both types of cement exhibit a high resistance to severe freeze-thaw attack. According to this the weight loss should not exceed 5 % by mass after 50 freeze-thaw cycles or 10 % by mass after 100 freeze-thaw cycles. In all cases the results show significantly lower frost erosion. Taking into account the experimental error of the test method it can be stated that there is no appreciable difference in the behaviour of the two types of cement.

#### 4.7 Resistance to freeze-thaw with de-icing salt

The results of the freeze-thaw tests with de-icing salt are shown in Figure 9. For both types of cement the maximum values of the frost erosion losses lie in the range of high resistance to severe freeze-thaw attack with de-icing salt. The spread of results is virtually identical for the two types of cement. The limit shown in the diagram was chosen from the established knowledge that air-entrained concretes made with Portland cement with composition and manufacture conforming with the regulations exhibit a high resistance to severe freeze-thaw attack with de-icing salt. This was used by the concrete technology committee of the DIBT (German Institute for Construction Technology) in Berlin for stipulating corresponding assessment criterion for the situation where a non-standardized cement is to be approved for use in a concrete with high resistance to freeze-thaw with de-icing salt.

#### 5 Summary

Portland limestone cements with up to 20 % high-grade limestone as specified in DIN 1164-1 were developed during the 80s by the cement manufacturers and, after extensive approval testing, were introduced onto the market as cements with building inspectorate approval. After over 10 years of testing in practical building construction and civil engineering they were adopted into DIN 1164-1 in

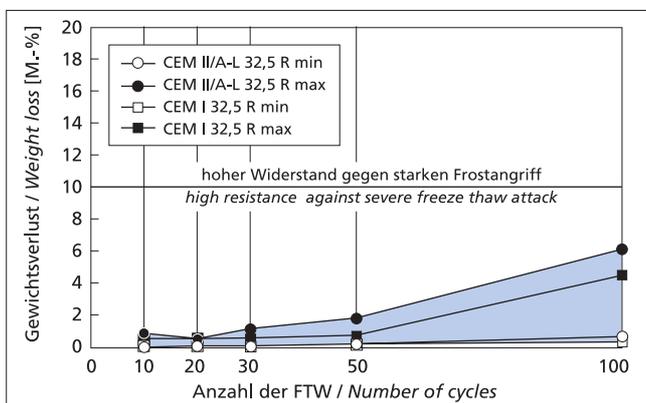


Bild 8: Gewichtsverlust des Betons bei Frost-Tau-Wechsel-Prüfung, geprüft an der Mischung 5  
Fig. 8: Weight loss of concrete during freeze-thaw testing with de-icing salt on Mix 5

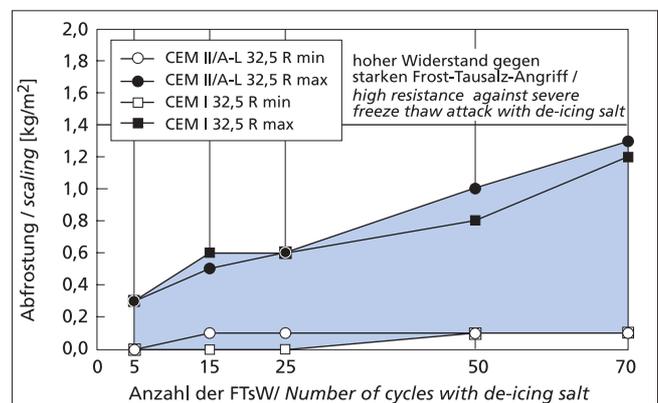


Bild 9: Abfröstung des Betons bei Frost-Tau-Wechsel-Prüfung, geprüft an der Mischung 6  
Fig. 9: Scaling of concrete during freeze-thaw testing with de-icing salt on Mix 6

zemente in den zur Betonherstellung maßgeblichen Regelwerken zu behandeln und dies in einer entsprechenden Ergänzung zu DIN 1045 festzulegen [13]. Diese Ergänzung wurde auch in die Bauregelliste A des Deutschen Instituts für Bautechnik übernommen [14].

Die baupraktische Gleichstellung von Portlandkalksteinzementen mit Portlandzementen in DIN 1045 konnte nach Auswertung der umfangreichen Zulassungsversuche getroffen werden. In dieser Veröffentlichung sind die wichtigsten Ergebnisse, die im Rahmen von Zulassungsverfahren vieler Portlandkalksteinzemente unterschiedlicher Hersteller gewonnen wurden, zusammenfassend dargestellt. Den Zementherstellern sei hiermit für eine Zurverfügungstellung der ihre Zemente betreffenden Ergebnisse gedankt.

Die dieser Veröffentlichung zugrunde liegenden Portlandkalksteinzemente besaßen gemäß DIN 1164-1 [2] den Mindestklinkergehalt von 80 M.-% und den Höchstgehalt an hochwertigem Kalkstein von 20 M.-% bezogen auf die Summe der Haupt- und Nebenbestandteile. Bei den großtechnisch hergestellten und zur baupraktischen Anwendung versandten Portlandkalksteinzementen CEM II/A-L liegt der Gehalt an Kalkstein wegen der sicheren Einhaltung der oberen Grenze von 20 % im Mittel etwas niedriger. Portlandkalksteinzemente werden überwiegend in der Festigkeitsklasse 32,5 R in geringen Mengen auch in den Festigkeitsklassen 42,5 R und 52,5 hergestellt. Die hier dargestellten Ergebnisse wurden an Mörteln und Betonen aus Portlandkalksteinzementen der Festigkeitsklasse 32,5 R gewonnen. Aus den Ergebnissen können folgende Schlußfolgerungen gezogen werden:

Die festigkeitsbildenden Eigenschaften einschließlich der Druckfestigkeitsentwicklung und der Nacherhärtung der geprüften Mörtel und Betone lassen keinen nennenswerten Unterschied der beiden Zementarten erkennen. In bezug auf die elastische Verformung, gekennzeichnet durch den statischen Elastizitätsmodul, verhalten sich Betone aus beiden Zementarten nahezu identisch. In den Laboruntersuchungen wiesen die Betone mit Portlandkalksteinzement im höheren Alter etwas größere Carbonatisierungstiefen auf als die Betone mit Portlandzement. Unter Berücksichtigung der in DIN 1045 festgelegten Anforderungen an die Betondeckung besitzen diese Unterschiede keine baupraktische Bedeutung.

Der Frostwiderstand des Betons mit Portlandkalksteinzement ist ebenso wie der des Betons mit Portlandzement in der Regel sehr hoch und entspricht damit den Festlegungen der DIN 1045 für Beton für Außenbauteile. Die Prüfung des Frost-Tausalz-Widerstands hat gezeigt, daß die Betone beider Zementarten einen hohen Widerstand gegen starken Frost-Tausalz-Angriff aufweisen und damit auch in Bauwerken mit sehr starkem Frost-Tausalz-Angriff eingesetzt werden können, wie z.B. Betonfahrbahndecken.

Die hier zusammengefaßten Ergebnisse umfangreicher Zulassungsuntersuchungen und die während mehr als zehn Jahren gewonnene praktische Erfahrung sollten Anlaß sein, die in DIN 1045 getroffenen Anwendungsregeln für Portlandkalksteinzemente auch in die ZTV-K [15] zu übernehmen.

1994 as standardized cements. On the basis of the findings obtained during the approval testing and the experience gathered during practical application in construction the appropriate standards committee in NABau (German Standards Organization for Civil Engineering) decided to treat Portland limestone cements in the same way as Portland cements in the body of legislation governing concrete production and to specify this in a corresponding supplement to DIN 1045 [13]. This supplement was also adopted into the Building Control List A of the Deutsche Institut für Bautechnik (German Institute for Construction Technology) [14].

Portland limestone cements were put on an equal footing with Portland cements in DIN 1045 for practical construction after evaluating the extensive approval tests. The most important results which were obtained during the approval procedure for a number of Portland limestone cements from different manufacturers are summarized in this paper. The cement manufacturers are to be thanked for making available the results relating to their cements.

The Portland limestone cements on which this paper is based had the minimum clinker content specified in DIN 1164-1 [2] of 80 % by mass and the maximum content of high-grade limestone of 20 % by mass relative to the total of the principal and secondary constituents. The average content of limestone in CEM II/A - L Portland limestone cements produced on an industrial scale and despatched for use in construction work is somewhat lower than this to be sure of complying with the upper limit of 20 %. Portland limestone cements are manufactured predominantly in the 32.5 R strength class, but also in small quantities in the 42.5 R and 52.5 strength classes. The results shown here were obtained on mortars and concretes made with Portland limestone cements of the 32.5 R strength class. The following conclusions were drawn from the results:

No appreciable differences between the two types of cement were found in the strength-forming properties, including the compressive strength development and secondary hardening of the mortars and concretes tested. Concretes from the two types of cement behaved virtually identically with respect to elastic deformation, characterized by the static modulus of elasticity. In the laboratory investigations the older concretes made with Portland limestone cements exhibited after longer exposures somewhat greater depths of carbonation than the concretes with Portland cement. Taking into account the requirements for concrete cover stipulated in DIN 1045 these differences have no practical constructional significance.

The freeze-thaw resistance of concrete made with Portland limestone cement is as a rule just as high as that of concrete with Portland cement, and therefore meets the requirements of DIN 1045 for concrete for external components. Testing the resistance to freeze-thaw with de-icing salt has shown that the concretes made with both types of cement exhibit a high resistance to severe freeze-thaw attack with de-icing salt, and can therefore also be used in structures exposed to very severe freeze-thaw attack with de-icing salt as e. g. concrete road surfaces.

The results summarized here from extensive approval investigations and the practical experience obtained over more than 10 years should also permit the application regulations for Portland limestone cement found in DIN 1045 to be adopted in the ZTV-K (Detailed Technical Specifications for Highway Structures) [15].

## Literatur

- [1] E DIN EN 197-1: Zement. Teil 1: Zusammensetzung, Anforderungen und Konformitätskriterien von allgemein gebräuchlichem Zement. Deutsche Fassung prEN 197-1:1998
- [2] DIN 1164-1: Zement. Teil 1: Zusammensetzung, Anforderungen, Ausgabe Oktober 1994
- [3] Prüfplan für die Zulassungsprüfung von Portlandkalksteinzement (Arbeitstitel: Steinmehlzement). Fassung April 1984, Deutsches Institut für Bautechnik (DIBT)
- [4] DIN 1045: Beton und Stahlbeton. Bemessung und Ausführung, Ausgabe Juli 1988
- [5] Schmidt, M.: Zement mit Zumahlstoffen - Leistungsfähigkeit und Umweltentlastung, Teil 1. Zement-Kalk-Gips 45 (1992), H. 2, S. 64-69
- [6] DIN EN 196-1: Prüfverfahren für Zement. Teil 1: Bestimmung der Festigkeit, Ausgabe März 1990
- [7] DIN 1048-1: Prüfverfahren für Beton. Teil 1: Frischbeton, Festbeton gesondert hergestellter Probekörper, Ausgabe Dezember 1978
- [8] Bunke, N.; et al.: Prüfung von Beton; Empfehlungen und Hinweise als Ergänzung zu DIN 1048, Heft 422, DAfStb, Berlin 1991
- [9] ÖNORM B 3306: Prüfung der Frost-Tausalz-Beständigkeit von Betonoberflächen, Ausgabe Mai 1973
- [10] DIN 1045: Beton und Stahlbeton. Bemessung und Ausführung, Ausgabe Dezember 1978
- [11] Krell, L.; Wischers, G.: Einfluß der Feinstoffe im Beton auf Konsistenz, Festigkeit und Dauerhaftigkeit. Beton 38 (1988) H. 10, S. 401-404, ebenso Betontechnische Berichte 1986-88, S. 175-197
- [12] Siebel, E.: Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand von Beton. Beton 42 (1992) H. 9, S. 496-501, ebenso Betontechnische Berichte 1992-94, S. 33-51
- [13] DIN 1045/A1: Beton und Stahlbeton. Bemessung und Ausführung, Änderung A1, Ausgabe Dezember 1996
- [14] Bauregelliste A. Abschnitt 1, Bauprodukte für den Beton- und Stahlbetonbau, Ausgabe 98/1, Deutsches Institut für Bautechnik (DIBT)
- [15] ZTV-K: Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen für Kunstbauten, Bundesministerium für Verkehr, Ausgabe 1996

