Christoph Müller, Sebastian Palm, Düsseldorf, Albrecht Wolter, Thomas Bohne, Clausthal

Hydratationsgrad basierte Kennwerte zur Vorhersage der Dauerhaftigkeit von Beton

Characteristic values based on degree of hydration for predicting the durability of concrete

Übersicht

Ausgangspunkt des Forschungsvorhabens war die Zunahme von bauaufsichtlichen Anwendungszulassungen für Zemente, die in Deutschland nach DIN 1045-2 nicht prinzipiell für alle Expositionsklassen zugelassen sind. Im Rahmen des Zulassungsverfahrens sind verschiedene Dauerhaftigkeitsprüfungen durchzuführen, die zum Beispiel in [1] beschrieben sind. Die entsprechenden Prüfverfahren sind jedoch zeit- und kostenintensiv.

Die VDZ gGmbH und die Technische Universität Clausthal haben deshalb in einem gemeinsamen Forschungsvorhaben Hydratationsgrad basierte Kennwerte ermittelt, die Rückschlüsse auf Dauerhaftigkeitskriterien zulassen. Das Verfahren zur Beurteilung von Zementen, die eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung erfordern, könnte damit unterstützt und ggf. beschleunigt werden. Vor der eigentlichen Dauerhaftigkeitsprüfung, die durch die Ergebnisse dieses Forschungsvorhabens nicht ersetzt, sondern nur ergänzt werden soll, kann festgestellt werden, ob ein Zement geeignet erscheint, eine solche Prüfung zu bestehen. Da in den Zulassungsprüfplänen die Betonrezepturen genau definiert sind, zielen die in diesem Forschungsvorhaben entwickelten Kennwerte nicht auf beliebig zusammengesetzte Betone, sondern auf beliebig zusammengesetzte Zemente in definierten Betonrezepturen ab.

Es konnte gezeigt werden, dass die Beton- bzw. Mörteldruckfestigkeit der in diesem Forschungsvorhaben untersuchten Zemente in den meisten Fällen nur schwache bzw. keine Orientierungswerte für die Ergebnisse der Dauerhaftigkeitsuntersuchungen liefert. Auf Basis des Hydratationsgrads von Zementstein sowie der Porosität von Normmörteln konnten Kennwerte ermittelt werden, die geeignet erscheinen, eine Bewertung hinsichtlich des jeweiligen Abnahmekriteriums der Dauerhaftigkeitsprüfungen zu ermöglichen. Für die Bestimmung der Kennwerte sind keine Versuche am Festbeton notwendig. Die Dauerhaftigkeit der zulassungskonform zusammengesetzten Betone lässt sich anhand von Zementstein- und Mörteleigenschaften abschätzen.

Abstract

The initial position for the research project was the increase in general technical approvals for cements that according to DIN 1045-2 are not approved in principle in Germany for all exposure classes. Various durability tests that are described in, for example[1], have to be carried out as part of the approval procedure. However, the corresponding test procedures are time-consuming and cost intensive.

In a joint research project VDZ gGmbH and Clausthal Technical University have therefore identified some characteristic values based on degree of hydration that allow conclusions to be drawn about durability criteria. This could support and possibly accelerate the procedure for assessing cements that require general technical approval. Before the actual durability testing, which is not to be replaced but only amplified by the results of this research project, it is possible to test whether a cement is suitable to pass such a test. The concrete mix formulations are precisely defined in the approval test plans so the characteristic values developed in this research project are not aimed at concretes with arbitrary compositions but at cements with arbitrary compositions in defined concrete mix formulations.

It has been possible to show that in most cases the concrete or mortar compressive strengths of the cements investigated in this research project provided only weak guide values or none at all for the results of the durability investigations. On the basis of the degree of hydration of the hardened cement paste and the porosity of standard mortars it was possible to identify characteristic values that seem suitable for carrying out an assessment with respect to the particular acceptance criteria of the durability tests. No tests on hardened concrete are needed for determining the characteristic values. The durability of concretes with compositions that conform to the approval test plans can be estimated with the aid of the properties of the hardened cement paste and mortar.

1 Einleitung

Das wesentliche Merkmal des Baustoffes Beton ist, bei sachgerechter Zusammensetzung, Herstellung und Nachbehandlung, neben der Festigkeit seine Dauerhaftigkeit. Sollen Zemente verwendet werden, mit denen keine baupraktischen Erfahrungen vorliegen, ist vor ihrem Einsatz zu prüfen, ob bei ihrer Anwendung dauerhafter Beton hergestellt werden kann. Hierzu ist in Deutschland eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung des Deutschen Instituts für Bautechnik (DIBt) erforderlich. Die durchzuführenden Prüfungen sind in entsprechenden Prüfplänen festgelegt und beurteilen die Eignung der entsprechenden Zemente anhand vorgegebener Kriterien.

Die VDZ gGmbH und die Technische Universität Clausthal haben in einem gemeinsamen Forschungsvorhaben untersucht, ob es möglich ist, Hydratationsgrad basierte Kennwerte zu ermitteln, die Rückschlüsse auf Dauerhaftigkeitskriterien zulassen. Vor der eigentlichen Dauerhaftigkeitsprüfung im Rahmen des Zulassungs-

1 Introduction

If a concrete has the correct composition and has been properly produced and cured its essential characteristics as a construction material are not only its strength but also its durability. If cements are to be used for which there is no practical construction experience then it is necessary to check whether durable concrete can be produced with them. In Germany this requires general technical approval from the DIBt (German Institute for Building Technology). The tests that have to be carried out are laid down in corresponding test plans and assess the suitability of the corresponding cements on the basis of predetermined criteria.

In a joint research project the VDZ gGmbH (German Cement Works Association) and Clausthal Technical University have investigated whether it is possible to determine characteristic values based on the degree of hydration that permit conclusions to be drawn about durability criteria. Before the actual durability testing during the approval procedure it could be possible to test whether

Tafel 1: Betonrezepturen und Prüfungen
Table 1: Concrete mix formulations and tests

Beton *Concrete*	Zementgehalt *Cement content*	w/z *w/c*	Luftgehalt im Frischbeton[1)] *Air content in the fresh concrete[1)]*	Festbetonprüfungen *Hardened concrete tests*
FB[2)]	450 g/Mischung 450 g/mixture	0,50	keine Vorgabe *no specification*	Druckfestigkeit, Carbonatisierung *compressive strength, carbonation*
B2	300 kg/m³	0,60	keine Vorgabe *no specification*	Druckfestigkeit, Würfelfrost *compressive strength, freeze-thaw cube test*
B3	320 kg/m³	0,50	keine Vorgabe *no specification*	Druckfestigkeit, CIF, Chlorideindringwiderstand *compressive strength, CIF, chloride migration resistance*
B4	320 kg/m³	0,50	(4,5 ± 0,5) %	Druckfestigkeit, CDF *compressive strength, CDF*

[1)] gemäß DIN EN 12350-7/*in accordance with DIN EN 12350-7*
[2)] Feinbetonrezeptur mit 1350g Sand und Kies der Sieblinie A8/B8
Fine concrete mix formulation with 1350 g sand and gravel with the A8/B8 grading curve

verfahrens könnte festgestellt werden, ob ein Zement geeignet erscheint, eine solche Prüfung zu bestehen. Da in den Zulassungsprüfungen in Deutschland die Betonrezepturen genau definiert sind, zielen die in diesem Forschungsvorhaben entwickelten Kennwerte nicht auf beliebig zusammengesetzte Betone, sondern auf beliebig zusammengesetzte Zemente in definierten Betonrezepturen ab. Diese sind in Tafel 1 zusammengestellt.

2 Ausgangsstoffe und Methoden

Es wurden zwei Portlandzemente und fünf weitere Zementhauptbestandteile (zwei Hüttensande, zwei Steinkohlenflugaschen und ein Kalkstein) in unterschiedlicher Feinheit ausgewählt (Bild 1). Aus diesen Komponenten wurden 28 Laborzemente innerhalb und außerhalb der Grenzen der derzeitigen DIN EN 197-1 hergestellt. Der nebenbestandteils- und sulfatträgerfrei gerechnete Klinkeranteil lag zwischen 50 und 100 M.-%. Weitere Hauptbestandteile wurden jeweils zwischen 0 und 35 M.-% eingesetzt. Zur Erweiterung der Datenbasis wurden Zemente aus Zulassungsverfahren – nach Freigabe durch den Antragsteller – anonymisiert in das Projekt mit einbezogen. Aus diesen Zementen wurde Betone gemäß den Vorgaben der DIBt-Zulassungsverfahren (s. Tafel 1) hergestellt und deren Druckfestigkeit und Dauerhaftigkeit geprüft.

Der Frostwiderstand wurde mit dem Würfelverfahren gemäß DIN EN 12390-9 und dem CIF-Verfahren gemäß CEN/TR 15177 geprüft. Der Frost-Tausalz-Widerstand wurde mit dem CDF-Verfahren gemäß DIN EN 12390-9 ermittelt. Der Chlorideindringwiderstand (Migrationskoeffizient) wurde mit dem Schnelltest gemäß des BAW-Merkblatts [2] geprüft. Der Widerstand gegen Carbonatisierung wurde an Feinbetonen mit w/z = 0,50 mit einer Sieblinie A8/B8 nach 7 und 28 Tagen Vorlagerung gemäß [1] bestimmt.

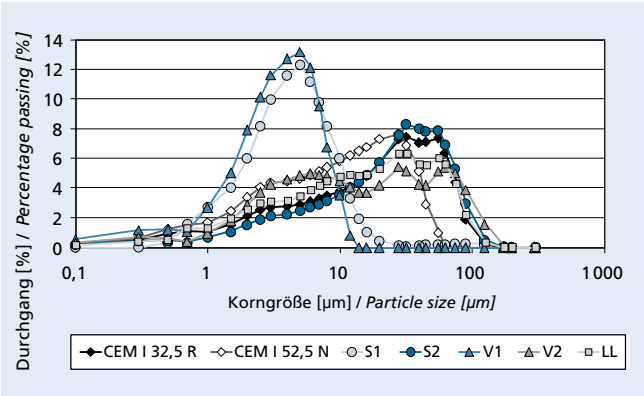

Bild 1: Korngrößenverteilung der Ausgangsstoffe
Figure 1: Particle size distributions of the starting materials

a cement seems suitable for passing such a approval procedure. The concrete mix formulations are precisely defined in the approval tests in Germany so the characteristic values developed in this research project are aimed not at concretes with arbitrary compositions but at cements with arbitrary compositions in defined concrete mix formulations. These are listed in Table 1.

2 Constituents and methods

Two Portland cements and five other main cement constituents (two granulated blastfurnace slags, two fly ashes from bituminous coal and a limestone) with differing finenesses were selected (Fig. 1). 28 laboratory cements, within and outside the limits of the current DIN EN 197-1, were produced from these components. The proportion of clinker, calculated without the secondary constituents and sulfate agent, lay between 50 and 100 mass %. Other main constituents were each used in proportions between 0 and 35 mass %. Cements from approval procedures – after clearance from the submitter – were also included anonymously in the project to extend the data base. Concretes were produced from these cements in accordance with the guidelines from the DIBt approval process (see Table 1) and tested for compressive strength and durability.

The freeze-thaw resistance was tested by the cube method specified in DIN EN 12390-9 and by the CIF method specified by CEN/TR 15177. The resistance to freeze-thaw with de-icing salt was determined by the CDF method specified in DIN EN 12390-9. The chloride penetration resistance (migration coefficient) was tested by the rapid test specified in the code of practice [2] issued by the BAW (Federal Waterways Engineering and Research Institute). The resistance to carbonation was determined on fine concretes with w/c = 0.50 and the A8/B8 grading curve after preliminary storage for 7 or 28 days as described in [1].

3 Evaluation and characteristic values

3.1 General

Not only the progress of hydration but also the pore system that is formed are of crucial importance for the durability of a concrete. During freeze-thaw stressing the air void system also has an influence on the scaling and the damage to the internal microstructure. Appropriate parameters were therefore evaluated for deriving characteristic values for predicting the durability. The degree of hydration (HG) of the hardened cement paste was determined at different test ages. Cement paste samples, in which the hydration was stopped after 2 days, 7 days or 28 days by grinding in acetone, washing with diethyl ether and then vacuum drying, were produced for this purpose. The hardened cement paste samples were then heated to a temperature of 1250 °C for simultaneous thermal analysis and the loss in mass attributable to water was evaluated with a mass spectrometer in the exhaust gas stream.

3 Auswertung und Kennwerte

3.1 Allgemeines

Für die Dauerhaftigkeit eines Betons sind zum einen der Hydratationsfortschritt und zum anderen das sich ausbildende Porensystem von entscheidender Bedeutung. Bei Frostbeanspruchungen hat zusätzlich das Luftporensystem einen Einfluss auf die Abwitterung bzw. die innere Gefügeschädigung. Entsprechende Parameter wurden daher zur Ableitung von Kennwerten zur Vorhersage der Dauerhaftigkeit ausgewertet. Der Hydratationsgrad (HG) wurde zu verschiedenen Prüfzeitpunkten am Zementstein bestimmt. Hierfür wurden Zementleimproben hergestellt, deren Hydratation nach 2 Tagen, 7 Tagen und 28 Tagen durch Mörsern in Aceton, Waschen mit Diethylether und anschließender Vakuumtrocknung gestoppt wurde. Die Zementsteinproben wurden im Anschluss in der Simultan-Thermo-Analyse bis zu einer Temperatur von 1250 °C aufgeheizt und der auf Wasser zurückzuführende Masseverlust mittels eines Massenspektrometers im Abgasstrom ausgewertet.

Gemäß Locher [3] wurde aus diesem Masseverlust Δm mithilfe der Gleichung $HG = \frac{\Delta m}{0{,}23}$ der Hydratationsgrad (HG) der Proben berechnet. Die Porenradienverteilung wurde gemäß DIN 66133 am Normmörtel im Alter von 28 Tagen untersucht. Die Porenradienverteilung wurde zum einen hinsichtlich diskreter Werte (Bild 2) ausgewertet. Zum anderen wurde die Porenradienverteilung, wie in Bild 3 dargestellt, mittels zweier Graden interpoliert. Ausgewertet wurden die Steigungen der beiden Graden S1 und S2 sowie der Schnittpunkt der Geraden (Grenzradius r_G).

Der Luftgehalt (L) wurde an Frisch- und Festbeton bestimmt, kann aber in erster Näherung auch anhand von Erfahrungswerten abgeschätzt werden. Diese Parameter sowie Parameterkombinationen wurden mit den Ergebnissen der Dauerhaftigkeitsuntersuchungen zum jeweiligen Bewertungszeitpunkt korreliert. In den folgenden Diagrammen ist die jeweils beste Korrelation, bezogen auf den Korrelationskoeffizient R^2, angegeben.

3.2 Chloridmigrationswiderstand

In Bild 4 bzw. Bild 5 sind die Korrelationen zwischen dem Chloridmigrationskoeffizienten der Betone B3 nach 35 Tagen und der Betondruckfestigkeit bzw. einem Kennwert (K_{Cl}) dargestellt.

In Deutschland gilt für Zulassungen ein Grenzwert von $D_{Cl} = 25 \times 10^{-12}$ m²/s [1]. Im Bereich des Wasserbaus ist für die Expositionsklassen XD1, XD2, XS1 und XS2 ein Wert von $D_{Cl} = 10 \times 10^{-12}$ m²/s gemäß BAW-Merkblatt „Chlorideindringwiderstand“ [2] maßgebend.

Bild 4 zeigt, dass zwischen der Betondruckfestigkeit und dem Chlorideindringwiderstand ein prinzipieller Zusammenhang besteht. Insbesondere bezüglich der genannten Grenzwerte können

The degree of hydration (HG) of the samples was calculated from this mass loss Δm using the equation $HG = \frac{\Delta m}{0{,}23}$ as described by Locher [3]. The pore size distribution was investigated in the standard mortar at 28 days as specified in DIN 66133. The pore size distribution was evaluated not only with respect to discrete values (Fig. 2) but also by interpolation using two straight lines (Fig. 3). The slopes of the two straight lines S1 and S2 were evaluated as well as the point of intersection of the straight lines (limit radius r_G).

The air content (L) was determined in fresh and hardened concrete but can also be estimated to a first approximation using empirical values. These parameters and parameter combinations were correlated with the results of the durability investigations at the respective times of evaluation. The following diagrams show the best correlation, in terms of the correlation coefficient R^2, for each case.

3.2 Resistance to chloride migration

The correlations between the chloride migration coefficients of the B3 concrete after 35 days and the concrete compressive strength and a characteristic value (K_{Cl}) are shown in Fig. 4 and Fig. 5 respectively.

A limit of $D_{Cl} = 25 \times 10^{-12}$ m²/s applies for technical approvals in Germany [1]. In the hydraulic engineering sector a value of $D_{Cl} = 10 \times 10^{-12}$ m²/s applies for exposure classes XD1, XD2, XS1 and XS2 in accordance with the BAW code of practice “Chloride penetration resistance” [2].

Fig. 4 shows that in principle there is a relationship between concrete compressive strength and chloride penetration resistance. However, no reliable information concerning the above-mentioned limits can be obtained from this relationship.

The relationship between the characteristic value $K_{Cl} = \frac{HG_{2d}}{P_{0,02}}$ and the chloride penetration resistance is shown in Fig. 5. The correlation coefficient of $R^2 = 0.71$ is significantly larger. For a cement that requires building inspectorate application approval and has a characteristic value of at least $K_{Cl} > 7$ it can be assumed that the chloride penetration resistance test will be passed. For the hydraulic engineering sector the characteristic value would have to be $K_{Cl} > 12$.

3.3 Freeze-thaw resistance (cube method)

The correlations between freeze-thaw resistance (cube method) of the B2 concrete and the concrete compressive strength and a characteristic value $K_{WF} = -1 \times HG_{2d} \times L \times \frac{S2}{r_G}$ are shown in Fig. 6 and Fig. 7 respectively.

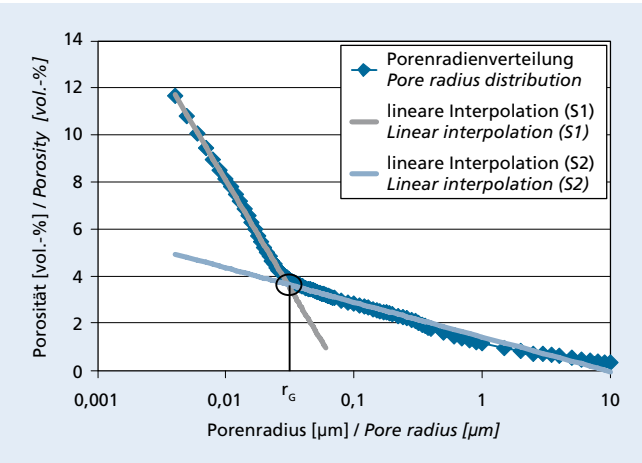

Bild 2: Auswertung der Porenradienverteilung mittels diskreter Werte

Figure 2: Evaluation of the pore radius distribution using discrete values

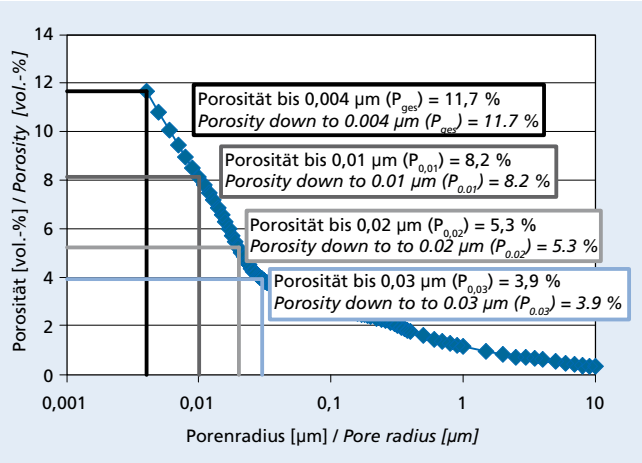

Bild 3: Auswertung der Porenradienverteilung mittels linearer Interpolation

Figure 3: Evaluation of the pore radius distibution by linear interpolation

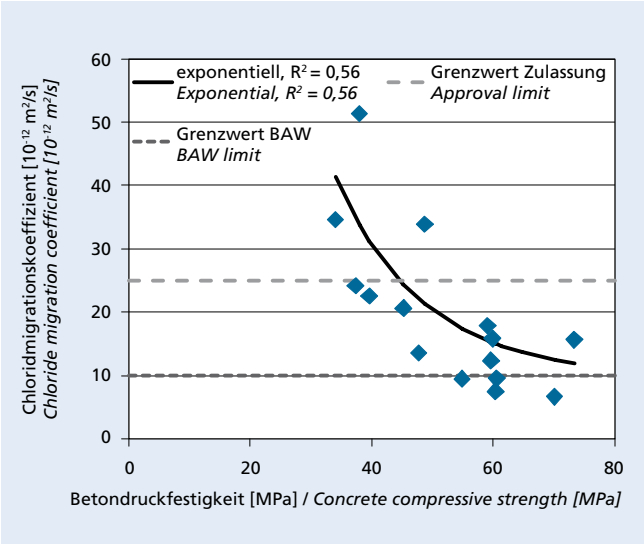

Bild 4: **Korrelation zwischen dem Chloridmigrationskoeffizienten und der Betondruckfestigkeit**
Figure 4: ***Correlation between the chloride migration coefficients and the concrete compressive strength***

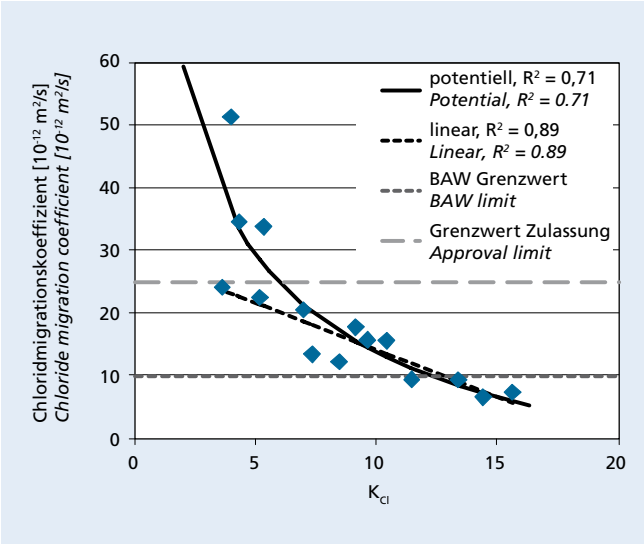

Bild 5: **Korrelation zwischen dem Chloridmigrationskoeffizienten und dem Kennwert K_{Cl}**
Figure 5: ***Correlation between the chloride migration coefficients and the characteristic value K_{Cl}***

auf Grundlage dieses Zusammenhangs jedoch keine zuverlässigen Aussagen getroffen werden.

In Bild 5 ist der Zusammenhang zwischen dem Kennwert $K_{CI} = \frac{HG_{7d}}{P_{0,02}}$ und dem Chlorideindringwiderstand dargestellt. Der Korrelationskoeffzient ist mit $R^2 = 0{,}71$ deutlich größer. Bei einem Zement, für den eine bauaufsichtliche Anwendungszulassung erforderlich ist und der mindestens einen Kennwert von $K_{Cl} > 7$ aufweist, kann davon ausgegangen werden, dass die Prüfung des Chlorideindringwiderstands bestanden wird. Für den Bereich des Wasserbaus müsste der Kennwert $K_{Cl} > 12$ sein.

3.3 Frostwiderstand (Würfelverfahren)

In Bild 6 bzw. Bild 7 sind die Korrelationen zwischen dem Frostwiderstand (Würfelverfahren) der Betone B2 und der Betondruckfestigkeit bzw. einem Kennwert $K_{WF} = -1 \times HG_{2d} \times L \times \frac{S2}{r_G}$ dargestellt.

Eine Abwitterung von maximal 10 M.-% nach 100 Frost-Tau-Wechseln (FTW) gilt in Deutschland als Grenzwert in Zulas-

A maximum scaling of 10 mass % after 100 freeze-thaw cycles is the limit in the approval procedure in Germany [1]. Fig. 6 shows a relationship in principle between the concrete compressive strength and the scaling. Above a strength of ≥ 40 MPa it can be assumed that the freeze-thaw resistance test by the cube method will be passed. However, the relationship shows a certain lack of clarity in the range between 30 and 40 MPa.

The correlation coefficient between the characteristic value K_{WF} and the scaling by the cube method is $R^2 = 0.9$. For a cement that requires building inspectorate application approval and has a characteristic value of at least $K_{WF} > 500$ it can be assumed that the test of freeze-thaw resistance by the cube method will be passed.

3.4 Freeze-thaw resistance (CIF method)

The correlations between the freeze-thaw resistance by the CIF method of the B3 concrete and the concrete compressive strength and a characteristic value $K_{CIF,E}$ (for the relative dynamic modulus of elasticity) are shown in Fig. 8 and Fig. 9 respectively.

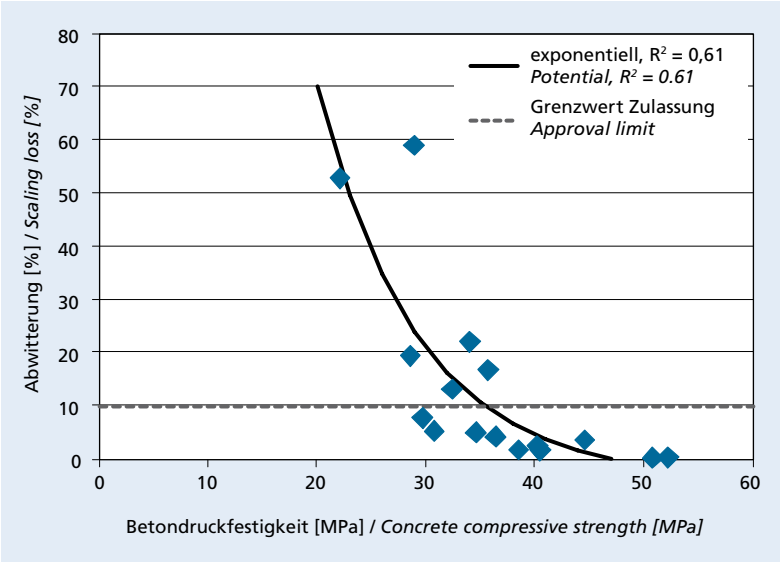

Bild 6: **Korrelation zwischen dem Frostwiderstand (Würfelverfahren) und der Betondruckfestigkeit**
Figure 6: ***Correlation between freeze-thaw resistance (cube test) and concrete compressive strength***

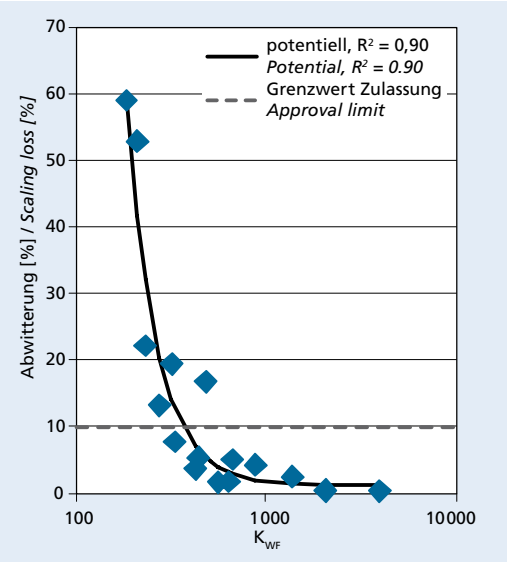

Bild 7: **Korrelation zwischen dem Frostwiderstand (Würfelverfahren) und dem Kennwert K_{WF}**
Figure 7: ***Correlation between freeze-thaw resistance (cube test) and the characteristic value K_{WF}***

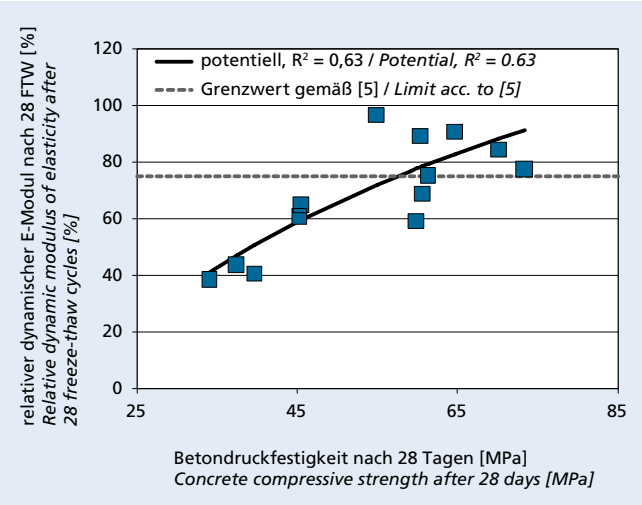

Bild 8: Korrelation zwischen dem Frostwiderstand (relativer dynamischer E-Modul, CIF) und der Betondruckfestigkeit

Figure 8: Correlation between the freeze-thaw resistance (relative dynamic elastic modulus, CIF) and concrete compressive strength

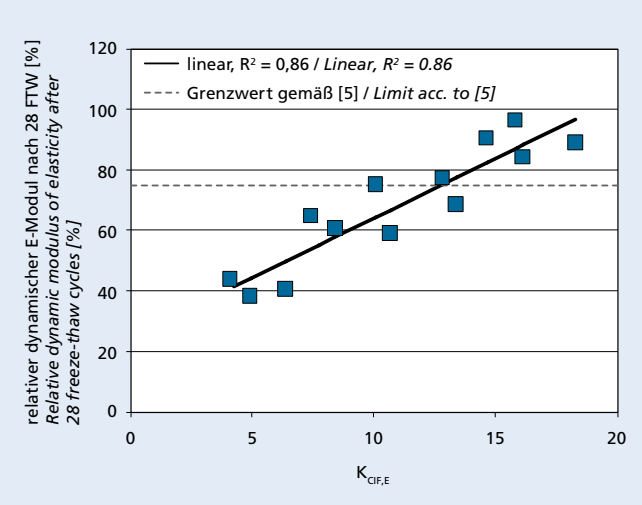

Bild 9: Korrelation zwischen dem Frostwiderstand (relativer dynamischer E-Modul, CIF) und dem Kennwert $K_{CIF,E}$

Figure 9: Correlation between the freeze-thaw resistance (relative dynamic elastic modulus, CIF) and the parameter $K_{CIF,E}$

sungsverfahren [1]. Bild 6 zeigt einen prinzipiellen Zusammenhang zwischen der Betondruckfestigkeit und der Abwitterung. Ab einer Festigkeit von ≥ 40 MPa kann davon ausgegangen werden, dass die Prüfung des Frostwiderstandes mit dem Würfelverfahren bestanden wird. Im Bereich zwischen 30 und 40 MPa weist der Zusammenhang jedoch eine gewisse Unschärfe auf.

Der Korrelationskoeffizient zwischen dem Kennwert K_{WF} und der Abwitterung im Würfelverfahren beträgt $R^2 = 0{,}9$. Bei einem Zement, für den eine bauaufsichtliche Anwendungszulassung erforderlich ist und der mindestens einen Kennwert von $K_{WF} > 500$ aufweist, kann davon ausgegangen werden, dass die Prüfung des Frostwiderstands mit dem Würfelverfahren bestanden wird.

3.4 Frostwiderstand (CIF-Verfahren)

In Bild 8 und Bild 9 sind die Korrelationen zwischen dem Frostwiderstand mit dem CIF-Verfahren der Betone B3 und der Betondruckfestigkeit bzw. einem Kennwert ($K_{CIF,E}$ für den relativen dynamischen E-Modul) dargestellt.

Bei einem Frostangriff im CIF-Verfahren ist bei nicht sachgerecht zusammengesetztem Beton nach [4] im Wesentlichen mit einer inneren Gefügeschädigung zu rechnen. Entsprechend gilt in Deutschland in einigen Anwendungsbereichen als wesentliches Abnahmekriterium ein relativer dynamischer E-Modul von mind. 75 % nach 28 FTW [1, 5]. Als zusätzliches Abnahmekriterium gilt eine maximale Abwitterung von 1,0 kg/m².

In Bild 8 wird deutlich, dass die Betondruckfestigkeit nicht ausreicht, das Abnahmekriterium „relativer dynamischer E-Modul" sicher vorherzusagen. Insbesondere Betone mit einer Betondruckfestigkeit von rd. 50 bis 60 MPa können deutliche Unterschiede im relativen dynamischen E-Modul nach 28 FTW aufweisen. Die Werte lagen hier zwischen 97 % und 59 % und schwanken damit um das Abnahmekriterium.

In Bild 9 ist der Zusammenhang zwischen dem Kennwert $K_{CIF,E} = \frac{HG_{28d}}{P_{0,02}}$ und dem relativen dynamischen E-Modul dargestellt. Dieser Zusammenhang verläuft linear. Ab einen Kennwert von rd. 14 halten die im Forschungsvorhaben eingesetzten Zemente bzw. Betone das Abnahmekriterium sicher ein.

3.5 Frost-Tausalz-Widerstand (CDF-Verfahren)

In Bild 10 und Bild 11 sind die Korrelationen zwischen der Abwitterung nach 28 FTW im CDF-Verfahren der Betone B4 und der Betondruckfestigkeit bzw. einem Kennwert (K_{CDF}) dargestellt.

Bei einem Frost-Tausalz-Angriff im CDF Verfahren ist hauptsächlich mit einer Schädigung der Oberfläche (Abwitterung) zu rechnen. Entsprechend gilt in Deutschland als Abnahmekriteri-

According to [4], it is to be expected that a concrete that does not have the correct composition will essentially suffer internal damage to the microstructure during freeze-thaw attack by the CIF method. A relative dynamic modulus of elasticity of at least 75 % after 28 freeze-thaw cycles is therefore the essential acceptance criterion in Germany in some application sectors [1, 5]. Maximum scaling of 1.0 kg/m² is an additional acceptance criterion.

In Fig. 8 it is clear that the concrete compressive strength is not sufficient to provide reliable prediction of the "relative dynamic modulus of elasticity" acceptance criterion. In particular, concretes with a concrete compressive strength of about 50 to 60 MPa can exhibit significant differences in relative dynamic modulus of elasticity after 28 freeze-thaw cycles. The values here lie between 97 % and 59 % and therefore fluctuate around the acceptance criterion.

The relationship between the characteristic value $K_{CIF,E} = \frac{HG_{28d}}{P_{0,02}}$ and the relative dynamic modulus of elasticity is shown in Fig. 9. This relationship is linear. Above a characteristic value of about 14 the acceptance criterion are safely satisfied by the cements and concretes used in the research project.

3.5 Resistance to freeze-thaw with de-icing salt (CDF method)

The correlations between scaling of the B4 concrete after 28 freeze-thaw cycles in the CDF method and the concrete compressive strength and a characteristic value (K_{CDF}) are shown in Fig. 10 and Fig. 11 respectively.

It is to be expected that freeze-thaw attack with de-icing salt in the CDF method will mainly result in damage to the surface (scaling). The acceptance criterion in Germany is therefore usually a maximum scaling of 1.5 kg/m² after 28 freeze-thaw cycles [1, 5]. A relative dynamic modulus of elasticity of at least 75 % after 28 freeze-thaw cycles is an additional acceptance criterion [5]. This was satisfied by all the concretes investigated.

There is no relationship between concrete compressive strength and the scaling (Fig. 10). Fig. 11 shows the linear correlation of the scaling with the characteristic value $K_{CDF} = HG_{2d} \times L \times \frac{P_{0,01}}{P_{total}}$. Cements with a characteristic value of $K_{CDF} < 120$ do not normally pass this test.

3.6 Carbonization behaviour of fine concretes

The carbonization tests were carried out on 40 mm x 40 mm x 160 mm fine concrete prisms made with Rhine gravel and Rhine sand complying with DIN EN 12620 and the A8/B8 particle size composition.

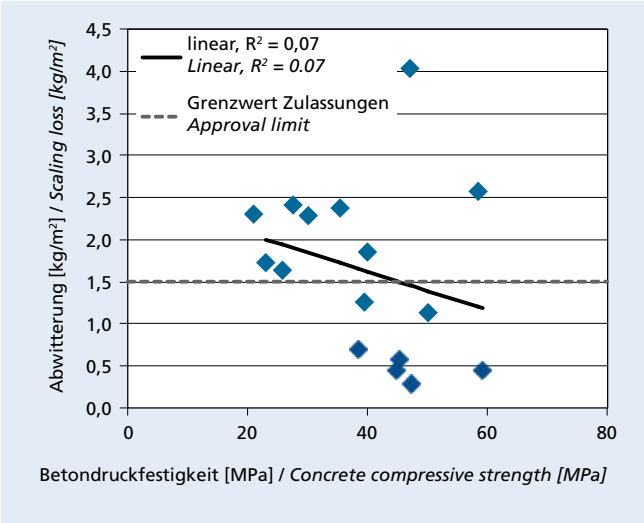

Bild 10: Korrelation zwischen dem Frostwiderstand (Abwitterung, CDF) und der Betondruckfestigkeit
Figure 10: Correlation between freeze-thaw resistance (scaling, CDF) and concrete compressive strength

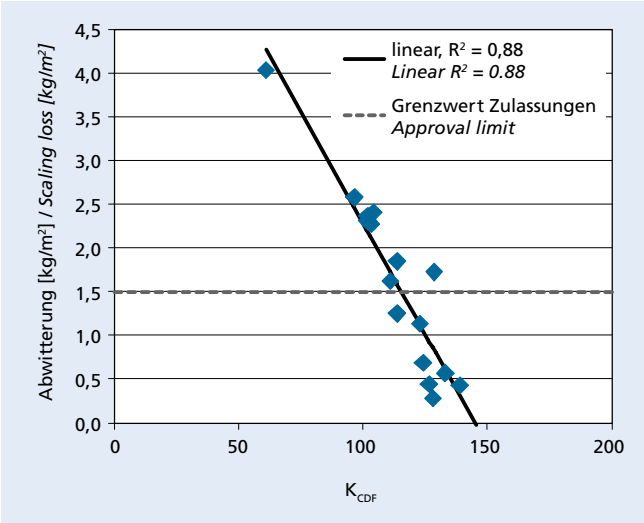

Bild 11: Korrelation zwischen dem Frostwiderstand (Abwitterung, CDF) und dem Kennwert K_{CDF}
Figure 11: Correlation between freeze-thaw resistance (scaling, CDF) and the characteristic value K_{CDF}

um üblicherweise eine maximale Abwitterung von 1,5 kg/m² nach 28 FTW [1, 5]. Als zusätzliches Abnahmekriterium gilt in [5] ein relativer dynamischer E-Modul von mind. 75 % nach 28 FTW. Dieses wird von allen untersuchten Betonen eingehalten.

Zwischen der Betondruckfestigkeit und der Abwitterung (Bild 10) besteht kein Zusammenhang. In Bild 11 ist eine lineare Korrelation der Abwitterung mit einem Kennwert $K_{CDF} = HG_{2d} \times L \times \frac{P_{0,01}}{P_{ges}}$ dargestellt. Zemente mit einem Kennwert von $K_{CDF} < 120$ bestehen diese Prüfung üblicherweise nicht.

3.6 Carbonatisierungsverhalten von Feinbetonen

Die Carbonatisierungsversuche wurden an Feinbetonprismen mit den Abmessungen 40 mm × 40 mm × 160 mm mit Rheinkies und Rheinsand nach DIN EN 12620 der Kornzusammensetzung A8/B8 durchgeführt.

Die Herstellung erfolgte nach DIN 196-1. Es wurden zehnmal drei Prismen hergestellt. Die Hälfte der Prismen wurde 7 Tage in Wasser mit einer Temperatur von (20 ± 1) °C vorgelagert, die an-

Ten lots of three prisms were produced and the production complied with DIN 196-1. Half the prisms were placed in preliminary storage in water at a temperature of 20 ± 1 °C for 7 days and the other half were stored in water at a temperature of 20 ± 1 °C for 28 days. The test pieces were then stored at a temperature of 20 ± 2 °C and a relative humidity of 65 ± 5 %.

The compressive strengths of the fine concretes were determined as specified in DIN EN 196-1 at the end of the preliminary storage (7 or 28 days). Pieces about 30 mm long were split from each of three test pieces and sprayed with phenolphthalein solution to test the depth of carbonation. After about 24 h the depths of carbonation were measured on each side of the pieces that had been split off and the average depth of carbonation was calculated. The corner regions were not taken into account. The test dates were set at 14 days, 56 days, 98 days, 140 days and one year of main storage. Most of the measured values lay well below the level specified by the DIBt [1]. No attempt was made to determine characteristic values based on degree of hydration and pore radius distribution.

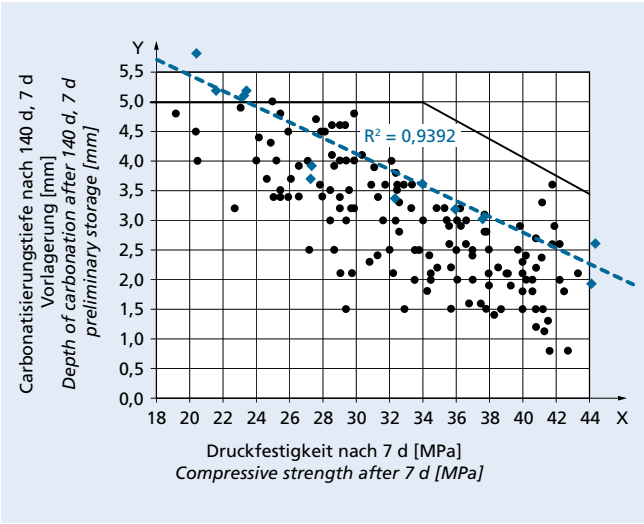

Bild 12: Carbonatisierungstiefe, 7 d Vorlagerung, Bewertungshintergrund des DIBt [1]
Figure 12: Depth of carbonation, 7 d preliminary storage, DIBt's evaluation background [1]

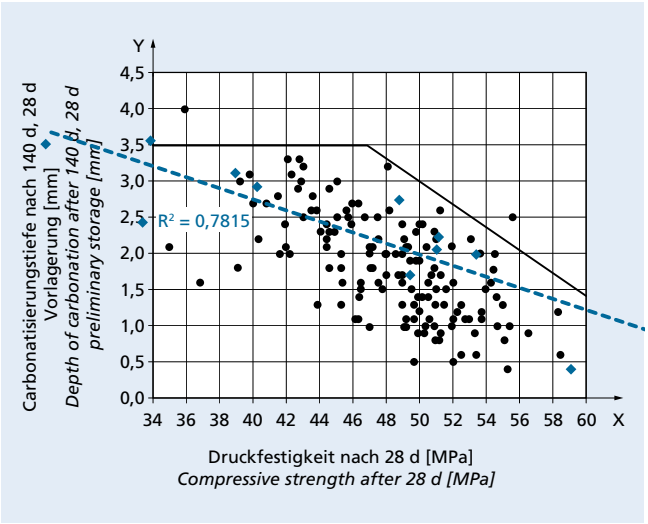

Bild 13: Carbonatisierungstiefe, 28 d Vorlagerung, Bewertungshintergrund des DIBt [1]
Figure 13: Depth of carbonation, 28 d preliminary storage, DIBt's evaluation background [1]

dere Hälfte lagerte 28 Tage in Wasser mit einer Temperatur von (20 ± 1) °C. Anschließend lagerten die Probekörper bei einer Temperatur von (20 ± 2) °C und einer relativen Feuchte von (65 ± 5) %.

Die Druckfestigkeit der Feinbetone wurde gemäß DIN EN 196-1 im Anschluss an die Vorlagerung (7 bzw. 28 Tage) ermittelt. Zur Prüfung der Carbonatisierungstiefe wurden von jeweils drei Probekörpern ca. 30 mm lange Stücke abgespalten und mit Phenolphtaleinlösung besprüht. Nach rd. 24 Stunden wurden die Carbonatisierungstiefen jeder Seite der abgespalteten Stücke ermittelt und die mittlere Carbonatisierungstiefe berechnet. Die Eckbereiche blieben unberücksichtigt. Als Prüftermine wurden 14 Tage, 56 Tage, 98 Tage, 140 Tage sowie ein Jahr Hauptlagerung festgelegt. Die ermittelten Werte ließen sich überwiegend in den Bewertungshintergrund des DIBt [1] einordnen (Bilder 12 und 13). Auf die Ermittlung von Kennwerten auf Basis des Hydratationsgrads bzw. der Porenradienverteilung wurde verzichtet.

4 Zusammenfassung

Es konnte gezeigt werden, dass die Beton- bzw. Mörteldruckfestigkeit der in diesem Forschungsvorhaben untersuchten Zemente in den meisten Fällen nur schwache bzw. keine Orientierungswerte für die Ergebnisse der Dauerhaftigkeitsuntersuchungen liefert. Auf Basis des Hydratationsgrads von Zementstein sowie der Porosität von Normmörteln konnten Kennwerte ermittelt werden, die geeignet erscheinen, eine Bewertung hinsichtlich des jeweiligen Abnahmekriteriums der Dauerhaftigkeitsprüfungen zu ermöglichen. Für die Bestimmung der Kennwerte sind keine Versuche am Festbeton notwendig. Die Dauerhaftigkeit der zulassungskonform zusammengesetzten Betone lässt sich anhand von Zementstein- und Mörteleigenschaften abschätzen.

Im Forschungsvorhaben wurde eine begrenzte Anzahl von Zementen bzw. Zementhauptbestandteilen verwendet. Die Erfahrungen müssen im Rahmen weiterer Untersuchungen bestätigt werden.

Danksagung

Das IGF-Vorhaben 17123 N wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestags gefördert.

4 Summary

It has been possible to show that in most cases the concrete or mortar strengths of the cements investigated in this research project provide only weak guide values or none at all for the results of the durability investigations. On the basis of the degree of hydration of the hardened cement paste and the porosity of standard mortars it was possible to identify characteristic values that seem suitable for carrying out an assessment with respect to the particular acceptance criteria of the durability tests. No tests on hardened concrete are needed for determining the characteristic values. The durability of concretes with compositions that conform to the approval test plans can be estimated with the aid of the properties of the hardened cement paste and mortar.

A limited number of cements and main cement constituents were used in the research project. Further investigations must be carried out to confirm the results.

Acknowledgement

The IGF project 17123 N was sponsored by the Federal Ministry of Economics and Energy through the AiF (Federation of Industrial Cooperative Research Associations) as part of the programme to promote Joint Industrial Research (IGF) based on a decision by the Germany Federal Parliament.

Literatur / Literature

[1] Principles of the equivalent durability procedure. CEN/TR 16563, 2013
[2] Chlorideindringwiderstand von Beton. Merkblatt der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), Karlsruhe 2004
[3] Locher, Friedrich W.: Zement: Grundlagen der Herstellung und Verwendung. Verlag Bau und Technik, Düsseldorf 2000
[4] Setzer, M. J.: Frostschaden: Grundlagen und Prüfung. Beton und Stahlbetonbau 97 (2002) H. 7, S. 350-359
[5] Frostprüfung von Beton. Merkblatt der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), Karlsruhe 2004