

Kennwerte zur Vorhersage der Dauerhaftigkeit von Beton

Beurteilung der Leistungsfähigkeit von Zementen für bauaufsichtliche Zulassungsprüfungen

1 Ausgangslage

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 Bau-technik (DIBt) erforderlich.

Die durchzuführenden Prüfungen sind in entsprechenden Prüfplänen festgelegt und beurteilen die Eignung der entsprechenden Zemente anhand vorgegebener Kriterien.

Die VDZ gGmbH (VDZ) und die Technische Universität Clausthal (TUC) haben nun 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 Zulassungsverfahrens könnte festgestellt werden, ob ein Zement geeignet erscheint, eine solche Prüfung zu bestehen. Da in den Zulassungsprüfplänen des DIBt die Betonrezepturen genau definiert sind, zielen die in diesem Forschungsvorhaben ent-

wickelten Kennwerte nicht auf beliebig zusammengesetzte Betone, sondern auf beliebig zusammengesetzte Zemente in definierten Betonrezepturen ab. Diese sind in Tabelle 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. Aus diesen Komponenten wurden 28 Laborzemente innerhalb und außerhalb der Grenzen der derzeitigen DIN EN 197-1 hergestellt. Zur Erweiterung der Datenbasis wurden Zemente aus Zulassungsverfahren – nach Freigabe durch den Antragsteller – anonymisiert in das Projekt mit einbezogen. Aus diesen Zementen wurden Betone gemäß den Vorgaben der DIBt-Zulassungsverfahren hergestellt und deren Druckfestigkeit und Dauerhaftigkeit geprüft.

Der Frostwiderstand wurde mit dem Würfel- und dem CIF-Verfahren, der Frost-Tausalz-Widerstand mit dem CDF-Verfahren ermittelt. Der Chlorideindringwiderstand (Migrationskoeffizient) wurde mit dem Schnelltest gemäß des BAW-Merkblattes [1] geprüft. Der Widerstand gegen Karbonatisierung wurde an Feinbetonen mit $w/z = 0,50$ mit einer Sieblinie A8/B8 nach 7 und 28 Tagen Vorlagerung bestimmt.

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, 7 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 [2] wurde aus diesem Masseverlust (Δm) mit Hilfe der Gleichung $HG = \frac{\Delta m}{0,23}$ der Hydratationsgrad (HG) der Proben berechnet. Die Porenradienverteilung P wurde gemäß DIN 66133 am Normmörtel im Alter von 28 Tagen untersucht.

Die Verteilung wurde zum einen hinsichtlich diskreter Werte (Bild 1, links) ausge-

Tabelle 1: Betonrezepturen und Prüfungen

Beton	Zementgehalt	w/z	Luftgehalt im Frischbeton ¹⁾	Festbetonprüfungen
1	2	3	4	5
FB ²⁾	450 g/Mischung	0,50	keine Vorgabe	Druckfestigkeit, Karbonatisierung
B2	300 kg/m ³	0,60	keine Vorgabe	Druckfestigkeit, Würfelfrost
B3	320 kg/m ³	0,50	keine Vorgabe	Druckfestigkeit, CIF, Chlorideindringwiderstand
B4	320 kg/m ³	0,50	4,5 ± 0,5	Druckfestigkeit, CDF

¹⁾ gemäß DIN EN 12350-7

²⁾ Feinbetonmischung mit 1350 g Sand und Kies der Sieblinie A8/B8

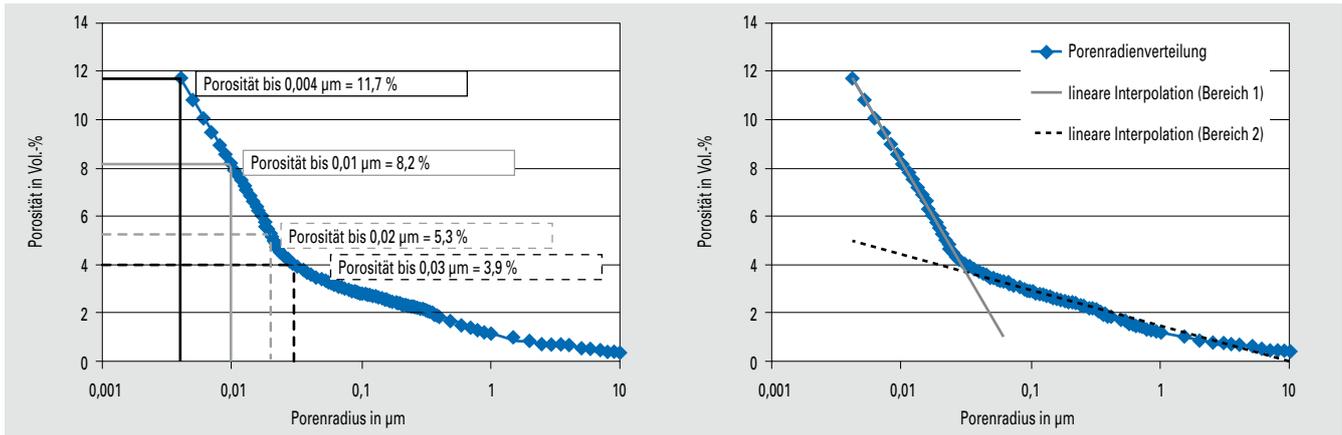


Bild 1: Beispielhafte Auswertung der Porenradienverteilung

wertet. Zum anderen wurde die Porenradienverteilung, wie in Bild 1 (rechts) dargestellt, mittels zweier Graden interpoliert. Ausgewertet wurden die Steigungen der beiden Graden S1 und S2 sowie der Schnittpunkt der Graden (Grenzzadius 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

Im Bild 2 bzw. Bild 3 sind die Korrelationen zwischen dem Chloridmigrationskoeffizienten nach 35 Tagen und der Betondruckfestigkeit bzw. einem Kennwert (K_{Cl}) dargestellt.

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

Bild 2 zeigt, dass zwischen der Betondruckfestigkeit und dem Chlorideindringwiderstand ein prinzipieller Zusammenhang besteht. Insbesondere bezüglich der genannten Grenzwerte können auf Grundlage dieses Zusammenhangs jedoch keine zuverlässigen Aussagen getroffen werden.

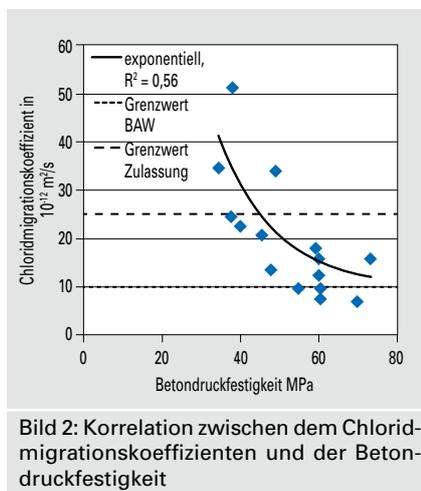


Bild 2: Korrelation zwischen dem Chloridmigrationskoeffizienten und der Betondruckfestigkeit

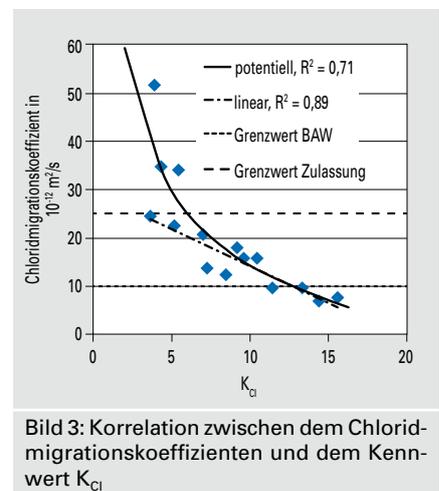


Bild 3: Korrelation zwischen dem Chloridmigrationskoeffizienten und dem Kennwert K_{Cl}

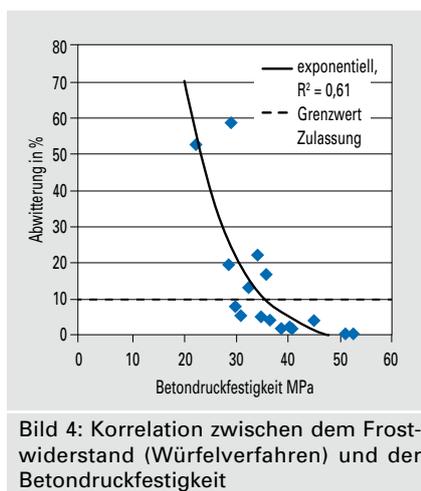


Bild 4: Korrelation zwischen dem Frostwiderstand (Würfelverfahren) und der Betondruckfestigkeit

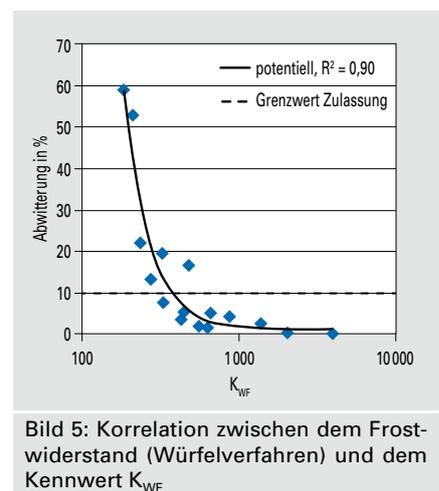


Bild 5: Korrelation zwischen dem Frostwiderstand (Würfelverfahren) und dem Kennwert K_{WF}

Im Bild 3 ist der Zusammenhang zwischen dem Kennwert

$$K_{Cl} = \frac{HG_{7d}}{P_{57\mu\text{m} - 0,02\mu\text{m}}}$$

und dem Chlorideindringwiderstand dargestellt. Der Korrelationskoeffizient 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 Chlorideindringwiderstandes bestanden wird. Für den Bereich des Wasserbaus müsste der Kennwert $K_{Cl} > 12$ sein.

3.3 Frostwiderstand (Würfelverfahren)

Im Bild 4 bzw. Bild 5 sind die Korrelationen zwischen dem Frostwiderstand mit dem Würfelverfahren und der Betondruckfestigkeit bzw. einem Kennwert

$$K_{WF} = -1 \times HG_{2d} \times L \times \frac{s_2}{r_G}$$

dargestellt.

Eine Abwitterung von maximal 10 M.-% nach 100 Frost-Tau-Wechseln (FTW) gilt als Grenzwert in Zulassungsverfahren für Beton mit $w/z = 0,60$. Bild 4 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 deutliche Unschärfe auf. Der Korrelationskoeffizient des Zusammenhangs zwischen dem Kennwert K_{WF} und der Abwitterung im Würfelverfahren ist mit $R^2 = 0,9$ deutlich höher als beim Zusammenhang zwischen Festigkeit und Abwitterung. 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 Frostwiderstandes mit dem Würfelverfahren bestanden wird.

3.4 Frostwiderstand (CIF-Verfahren)

Im Bild 6 und Bild 7 sind die Korrelationen zwischen dem Frostwiderstand mit dem CIF-Verfahren 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 [3] 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 [4], [5]. Als zusätzliches Abnahmekriterium gilt eine maximale Abwitterung von $1,0 \text{ kg/m}^2$.

Im Bild 6 wird deutlich, dass die Betondruckfestigkeit nicht ausreicht, das Abnahmekriterium „relativer dynamischer E-Modul“ sicher vorherzusagen. Insbesondere Betone mit einer Betondruck-

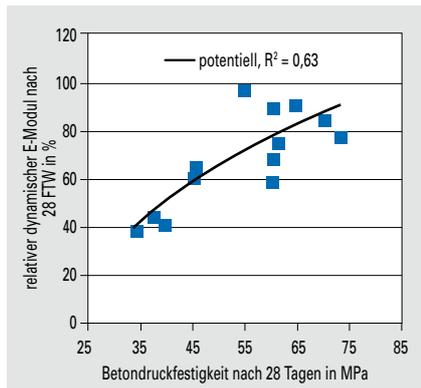


Bild 6: Korrelation zwischen dem Frostwiderstand (relativer dynamischer E-Modul, CIF) und der Betondruckfestigkeit

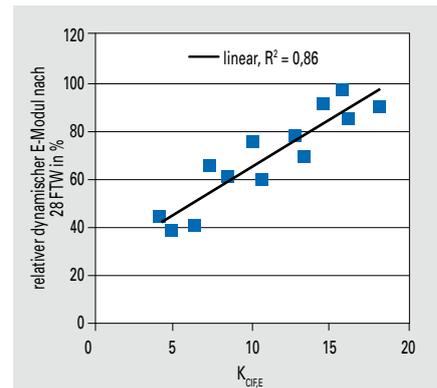


Bild 7: Korrelation zwischen dem Frostwiderstand (relativer dynamischer E-Modul, CIF) und dem Kennwert $K_{CIF,E}$

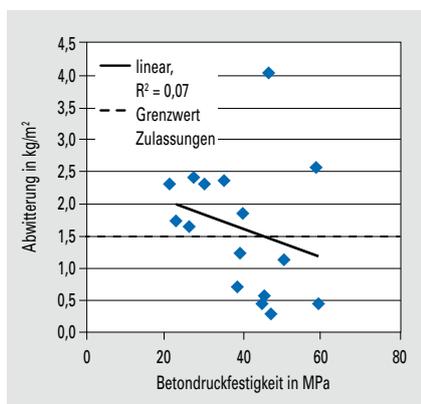


Bild 8: Korrelation zwischen dem Frostwiderstand (Abwitterung, CDF) und der Betondruckfestigkeit

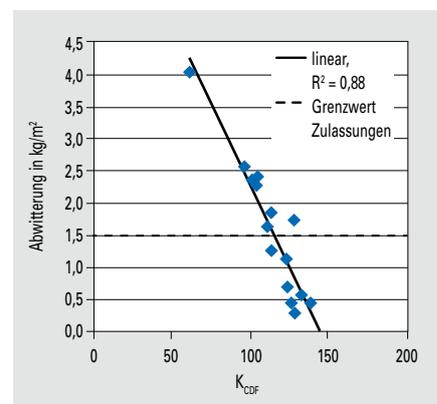


Bild 9: Korrelation zwischen dem Frostwiderstand (Abwitterung, CDF) und dem Kennwert K_{CDF}

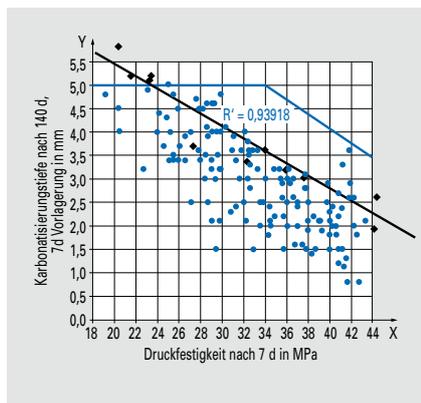


Bild 10: Karbonatisierungstiefe, 7d Vorlagerung, Bewertungshintergrund des DIBt [5]

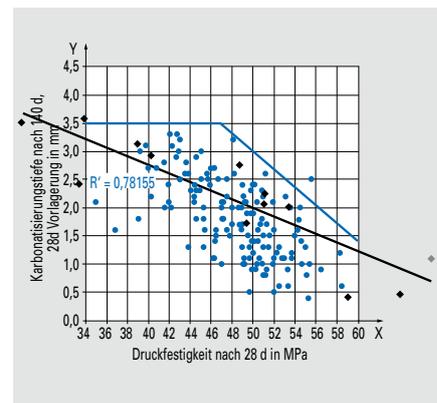


Bild 11: Karbonatisierungstiefe, 28d Vorlagerung, Bewertungshintergrund des DIBt [5]

festigkeit 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.

Im Bild 7 ist der Zusammenhang zwischen dem Kennwert

$$K_{CIF,E} = \frac{HG_{28d}}{P_{57\mu\text{m} - 0,02\mu\text{m}}}$$

und dem relativen dynamischen E-Modul dargestellt. Dieser Zusammenhang verläuft linear. Ab einem Kennwert von rd. 14 halten die im Forschungsvorhaben eingesetzten Zemente bzw. Betone das Abnahmekriterium sicher ein.

3.5 Frost-Tausalz-Widerstand (CDF-Verfahren)

Im Bild 8 und Bild 9 sind die Korrelationen zwischen der Abwitterung nach 28 FTW im CDF-Verfahren 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 Abnahmekriterium üblicherweise eine maximale Abwitterung von $1,5 \text{ kg/m}^2$ nach 28 FTW [4], [5]. Als zusätzliches Abnahmekriterium gilt in [4] 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 8) besteht kein Zusammenhang. Im Bild 9 ist eine lineare Korrelation der Abwitterung mit einem Kennwert

$$K_{CDF} = HG_{2d} \times L \times \frac{P_{57 \mu\text{m}} - 0,01 \mu\text{m}}{P_{ges}}$$

dargestellt.

Zemente mit einem Kennwert von $K_{CDF} < 120$ bestehen diese Prüfung üblicherweise nicht.

3.6 Karbonatisierungsverhalten von Feinbetonen

Die Karbonatisierungsversuche wurden an Feinbetonprismen mit den Abmessungen $40 \text{ mm} \times 40 \text{ mm} \times 160 \text{ mm}$ mit Rheinkies und Rheinsand nach DIN EN 12620 der Kornzusammensetzung A8/B8 durchgeführt.

Die Herstellung erfolgte nach DIN 196-1. Es wurden 10×3 Prismen hergestellt.

Die Hälfte der Prismen wurde 7 Tage in Wasser mit einer Temperatur von $(20 \pm 1) \text{ }^\circ\text{C}$ vorgelagert, die andere Hälfte lagerte 28 Tage in Wasser mit einer Temperatur von $(20 \pm 1) \text{ }^\circ\text{C}$. Anschließend lagerten die Probekörper bei einer Temperatur von $(20 \pm 2) \text{ }^\circ\text{C}$ und einer relativen Feuchte von $(65 \pm 5) \%$.

Die Druckfestigkeit der Feinbetone wurde gemäß DIN EN 196-1 im Anschluss an die Vorlagerung (7 bzw. 28 Tage) ermittelt. Zur Prüfung der Karbonatisierungstiefe wurden von jeweils drei Probekörpern ca. 30 mm lange Stücke abgespalten und mit Phenolphthaleinlösung besprüht. Nach rd. 24 Stunden wurden die Karbonatisierungstiefen jeder Seite der abgespaltenen Stücke ermittelt und die mittlere Karbonatisierungstiefe wurde berechnet. Die Eckbereiche blieben unberücksichtigt. Als Prüftermine wurden 14, 56, 98, 140 Tage sowie ein Jahr Hauptlagerung festgelegt. Die ermittelten Werte ließen sich überwiegend in den Bewertungshintergrund des DIBt [5] einordnen (Bild 10 und Bild 11). Auf die Ermittlung von Kennwerten auf Basis des Hydratationsgrades bzw. der Porenradialverteilung wurde verzichtet.

4 Zusammenfassung

Es konnte gezeigt werden, dass die Beton- bzw. Mörteldruckfestigkeit der in diesem Forschungsvorhaben untersuchten Zemente in einigen Fällen (Abwitterung im Würfelverfahren, Karbonatisierung von Feinbetonprismen) ausreichend erscheint, eine Abschätzung bezüglich der jeweiligen Abnahmekriterien vorzunehmen.

Für andere Prüfungen, wie den Chlorideindringwiderstand, die innere Gefügeschädigung im CIF-Verfahren sowie die

Abwitterung im CDF-Verfahren liefert die Druckfestigkeit nur schwache bzw. keine Anhaltswerte. Für diese Dauerhaftigkeitsparameter konnten Kennwerte auf Basis des Hydratationsgrades von Zementstein sowie der Porosität von Normmörteln ermittelt werden, die geeignet erscheinen, eine Bewertung hinsichtlich des Abnahmekriteriums 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 Mörtel Eigenschaften abschätzen.

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

5 Literatur

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