

HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

Conference Paper, Published Version

Dauberschmidt, Christoph

Chlorideindringwiderstand von Betonen und Mörteln

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/105498>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

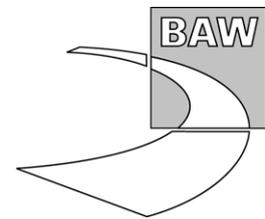
Dauberschmidt, Christoph (2004): Chlorideindringwiderstand von Betonen und Mörteln. In: Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.): Instandsetzung von Wasserbauwerken. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau. S. 47-54.

Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.





Dipl.-Ing. C. Dauberschmidt, ibac -Institut für Bauforschung, RWTH Aachen
Chlorideindringwiderstand von Betonen und Mörteln

Einführung

Die Dauerhaftigkeit von Küstenbauwerken ist neben der Frosteinwirkung und mechanischer Einwirkungen maßgeblich durch das Eindringen von Chloriden in den Beton und damit einsetzender Bewehrungskorrosion limitiert.

Dabei ist nach Bild 1 die Schädigung eines Bauteils infolge chloridinduzierter Korrosion in mehrere Phasen eingeteilt: in der Phase 1, der Einleitungsphase, gelangen Chloride durch z.B. Diffusion in den Beton und führen nach Überschreiten einer kritischen Chloridkonzentration am Bewehrungsstahl zu dessen Depassivierung. Bei fortschreitender Korrosion kommt es in der Schädigungsphase infolge Volumenvergrößerung der Korrosionsprodukte zu einem Sprengdruck, was auf lange Sicht zu Rissen in der Betondeckung und letztendlich zum Abplatzen der Betondeckung führt. Bei weiter fortschreitender Korrosion kann es zu Bauteilversagen im Bruchgrenzzustand führen.

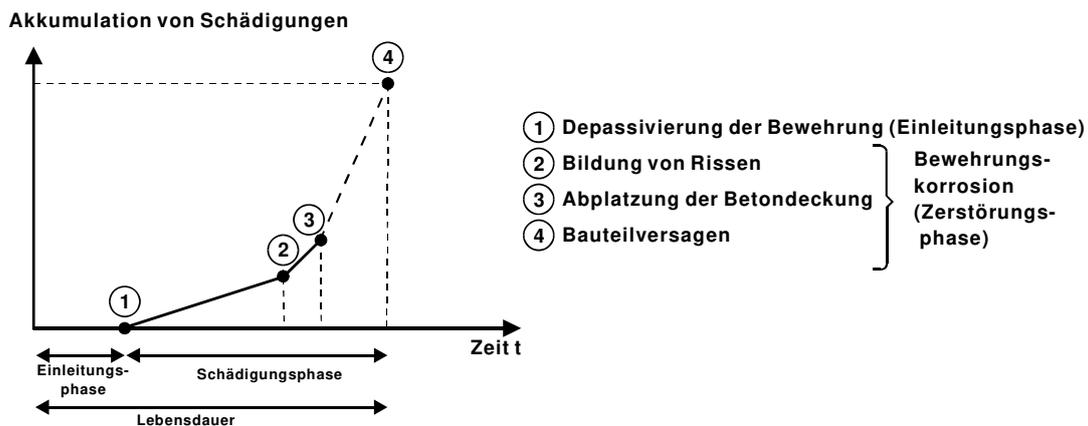
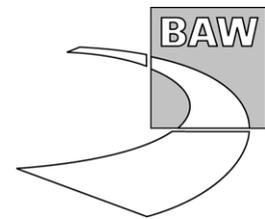


Bild 1: Zeitlich fortschreitende Akkumulation der korrosionsinduzierten Schädigungen /2/

Ziel einer dauerhaften Konstruktion sollte es sein, durch Wahl eines geeigneten Betons und einer ausreichender Betondeckung die Einleitungsphase und damit den Zeitpunkt des Korrosionsbeginns zu verlängern, da bis zu diesem Zeitpunkt das Bauwerk noch keine Schädigungen aufweist. Diese Einleitungsphase ist mit den vorhandenen Modellen mathematisch gut zu beschreiben, und das Ende dieser Phase wird häufig als Gebrauchsgrenzzustand bei der Dauerhaftigkeitsbemessung definiert.

In den folgenden Kapiteln wird zunächst beispielhaft eine Dauerhaftigkeitsbemessung für chloridinduzierte Korrosion durchgeführt. Anschließend werden die Ergebnisse eines von der BAW initiierten Forschungsvorhabens vorgestellt, in dessen Rahmen Dauerhaftigkeitsmessungen an Küstenbauwerken durchgeführt wurden, um zu überprüfen, ob das vorhandene Regelwerk (maßgeblich: ZTV-W LB 215 und 219) eine ausreichende Dauerhaftigkeit



gewährleistet. Die Ergebnisse dieses Forschungsvorhabens flossen in die Neuformulierung der ZTV-W LB 215 und LB 219 mit ein. Weiterhin wurde ein BAW-Merkblatt zum „Chlorideindringwiderstand von Beton“ erstellt, das die Prüfung des Migrationskoeffizienten beschreibt und eine vereinfachte Möglichkeit zur Abschätzung der Dauerhaftigkeit speziell für die Exposition der Wasserwechselzone bietet.

Chlorideindringen an einem Meeresbauwerk (Beispiel)

Allgemeines

Im Rahmen eines von der BAW veranlassten Forschungsvorhabens zur Dauerhaftigkeit von Instandsetzungssystemen /1/ wurden Betonplatten mit und ohne unterschiedlichen Beschichtungen am Eidersperrwerk (Nordsee) und bei Eckernförde (Ostsee) in unterschiedlichen Expositionsklassen (wie z.B. Sprühnebel und Wasserwechselzone) ausgelagert und nach 4 bzw. 6 Jahren u.a. hinsichtlich Chlorideindringen untersucht.

Chloridgehalte nach 6 Jahren Auslagerung

Zunächst wurden die Chloridgehalte tiefengestaffelt durch Entnahme von Bohrmehl in Tiefenschritten von 0-8 mm, 12-20 mm und bereichsweise auch in Tiefenlagen von 24-32 mm und 36-44 mm bestimmt. Die Chloridgehalte wurden durch Säureaufschluss (gemäß DAfStb-Heft 401) als Gesamtchloridgehalte bestimmt und sind in Abhängigkeit der Exposition, des Betons und des Bauwerks in Bild 1 dargestellt.

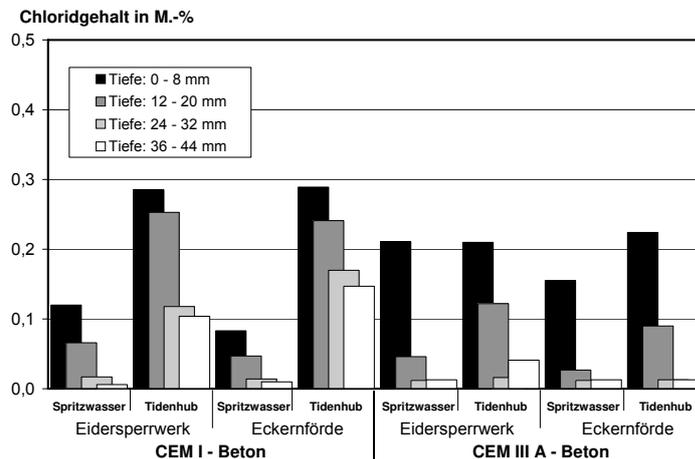
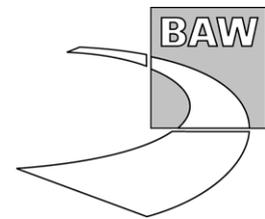


Bild 2: Tiefengestaffelte Chloridgehalte für die Expositionen „Wasserwechselzone“ (Tidenhub) und „Sprühnebel/Spritzwasser“ (Spritzwasser) nach 6 Jahren Auslagerung /1/

Bestimmung des Diffusionskoeffizienten und der Oberflächenkonzentration

Um den Chlorideindringwiderstand einzelner Betone zu bestimmen, erfolgt die Ermittlung der Diffusionskoeffizienten und Oberflächenkonzentrationen mittels Minimierung der Fehlerquadrate nach dem zweiten Fick'schen Diffusionsgesetz. Bild 3 zeigt das Prinzip dieser Auswertung beispielhaft.



Dauerhaftigkeitsbetrachtung

Mit Hilfe der Diffusionskoeffizienten und Oberflächenkonzentrationen ist es nun möglich, die Chloridprofile zu beliebigen Zeitpunkten im Rahmen einer Dauerhaftigkeitsbemessung abzuschätzen. Die hinter einer Dauerhaftigkeitsbemessung bei chloridinduzierte Korrosion stehenden Modellgleichung basiert auf dem 2. Fick'schen Diffusionsgesetz, das in Gleichung (1) zur Berücksichtigung der beton- und expositionsspezifischen Einflüsse modifiziert wurde /2/.

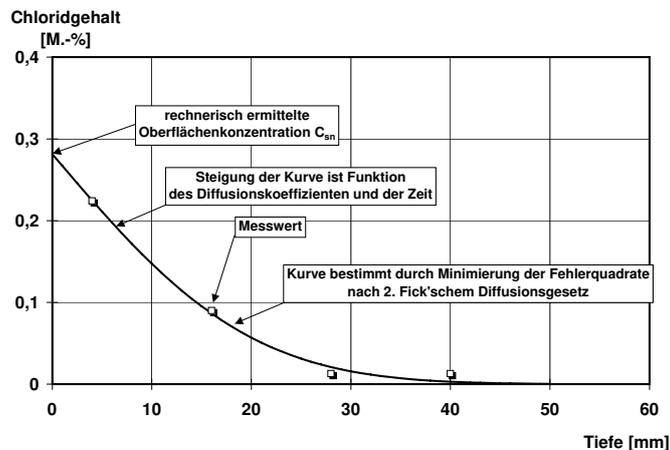
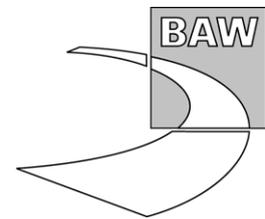


Bild 3: Bestimmung des Chloriddiffusionskoeffizienten und der Oberflächenkonzentration anhand der ermittelten Chloridgehalte (Beispiel Tidenhub, Auslagerungsort Eckernförde, CEM III A; siehe Bild 2)

$$C(x, t) = C_{S, \Delta x} \cdot \left[1 - \operatorname{erf} \frac{x - \Delta x}{2 \cdot \sqrt{D_{\text{Eff}, C}(t) \cdot t}} \right] \quad \text{Gleichung (1)}$$

mit $D_{\text{Eff}, C}(t) = k_e \cdot D_{\text{RCM}, 0} \cdot k_t \cdot A(t)$ und $A(t) = \left(\frac{t_0}{t} \right)^a$

- $D_{\text{Eff}, C}(t)$: Effektiver Chloriddiffusionskoeffizient von Beton zum Beobachtungszeitpunkt t , [$10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$]
- $D_{\text{RCM}, 0}$: Chloridmigrationskoeffizient von wassergesättigtem Beton, bestimmt zum Referenzzeitpunkt t_0 an definiert hergestellten und vorgelagerten Prüfkörpern, [$10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$]
- $C_{S, \Delta x}$: Chloridkonzentration in Tiefe Δx in Abhängigkeit der anstehenden Chlorideinwirkung, zum Zeitpunkt t [M.-%/z]
- k_e : Parameter zur Berücksichtigung der Temperaturabhängigkeit von $D_{\text{Eff}, C}(t)$
- a : Exponent zur Berücksichtigung der Zeitabhängigkeit von $D_{\text{Eff}, C}(t)$, Altersexponent, [-]
- k_t : Übertragungsparameter, um Abweichungen zwischen Chloridmigrationskoeffizienten, die unter beschleunigten Bedingungen (Rapid Chloride Migration – $D_{\text{RCM}, 0}$) ermittelt werden, und Diffusionskoeffizienten, die unter natürlichen Bedingungen z. B. im Labor bestimmt werden (Chloride Profiling Method – $D_{\text{CPM}, 0}$), berücksichtigen zu können, [-]
- A : Alterungsterm, [-]
- t : Betonalter in [s]
- t_0 : Referenzzeitpunkt in [s]
- Δx : Tiefenbereich in [m], der durch ggf. intermittierende Chlorideinwirkung bedingt, vom Fick'schen Verhalten abweichende Chloridkonzentrationen zeigt.
- x : Tiefe in [m], mit einem korrespondierenden Chloridgehalt $C(x, t)$



Auf Grundlage dieser Gleichung (1) wurde am Beispiel des am Eidersperwerks ausgelagerten Prüfkörpers eine Dauerhaftigkeitsbetrachtung durchgeführt. Dabei wurden die in /1/ ermittelten Parameter wie Diffusionskoeffizient, Oberflächenkonzentration und mittleren Wassertemperatur in Gleichung (1) eingesetzt. Die anderen Parameter wurden im Rahmen einer Literaturrecherche abgeschätzt /3/.

Bild 4 zeigt das nach 6 Jahren ermittelte Chloridprofil eines CEM I-Betons für die Exposition „Wasserwechselzone“ mit dem nach dem Diffusionsgesetz gefitteten Kurvenverlauf. Nach Gleichung (1) ist es nun möglich, das Chloridprofil in einem Bauteil-Alter von 50 Jahren abzuschätzen. Es zeigt sich, dass der kritische Chloridgehalt bis in großen Tiefen überschritten ist, d.h. auch Bewehrung mit einer Überdeckung von über 80 mm wird nach 50 Jahren bereits korrodieren. Bei einer Betondeckung c_{nom} von 60 mm ist nach ca. 12 Jahren mit der Depassivierung der Bewehrung und damit mit Beginn der Zerstörungsphase zu rechnen.

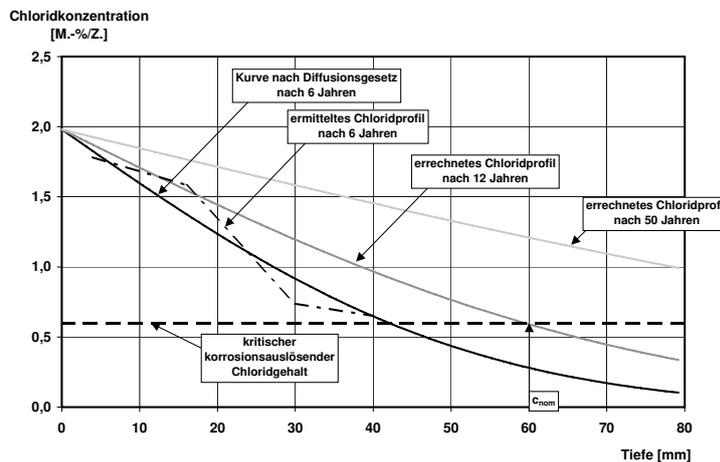


Bild 4: Errechnete Chloridprofile für den Auslagerungsort Eidersperwerk und CEM I-Beton nach 6, 12 und 50 Jahren

Dauerhaftigkeitsbemessungen von Meeresbauwerken

Dauerhaftigkeitsbemessung nach alter DIN 1045 bzw. ZTV-W LB 215

Die im Rahmen des Forschungsvorhabens „Dauerhaftigkeit von Küstenbauwerken“ /3/ (gefördert durch das BAW) durchgeführten Dauerhaftigkeitsbemessungen zeigen, dass bei Bauwerken, die gemäß der alten DIN 1045 (1988) hinsichtlich der geforderten Betonrezeptur und Betondeckung ausgeführt wurden, mit Beginn der Korrosion innerhalb von 50 Jahren bei der Exposition „Wasserwechselzone“ gerechnet werden muss, wenn keine Betone mit besonders hohem Chlorideindringwiderstand verwendet wurden. Auch die in der alten ZTV-W LB 215 geforderte, gegenüber der alten DIN 1045 erhöhte Betondeckung kann u.U. innerhalb von 50 Jahren zu Korrosion der Bewehrung führen.

Modifizierung der neuen ZTV-W (LB 215 und LB 219, 2004)

Diese Erkenntnisse flossen bei der Erarbeitung der ZTV-W (LB 215 und LB 219, Gelbdruck 2004) /5/ durch eine Modifizierung der Betonrezepturen mit ein: zukünftig sind für die Expositionsclassen XD 3 und XS 3 entweder die Verwendung hüttensandhaltiger Zemente oder die Verwendung von Flugasche vorgeschrieben.

Prüfmethode zur Bestimmung des Chlorideindringwiderstandes

Um zukünftig aber auch Betone und Instandsetzungssysteme einsetzen zu können, die eine unbekannte Zusammensetzung besitzen (z.B. SPCC) oder deren Betonrezeptur von der oben beschriebenen Betonrezeptur abweichen, wurde eine Prüfmethode zur Bestimmung des Chlorideindringwiderstandes von Beton und Mörteln im Rahmen eines BAW-Merkblattes /6/ festgeschrieben.

Das Prinzip dieser Prüfung besteht in dem beschleunigten Eindringen von Chloriden in den zu untersuchenden Beton/Mörtel durch Anlegen eines elektrischen Feldes, der sogenannten Migration. Nach Ende der Potentialbeaufschlagung wird nach Spalten der Probe mittels Indikatorlösung die Eindringtiefe der Front der freien Chloridionen ermittelt. Aus der Eindringtiefe, der Höhe der angelegten Spannung und weiteren Parametern wird der Chloridmigrationskoeffizient berechnet. Bild 5 zeigt schematisch den Versuchsaufbau.

Dieser ermittelte Migrationskoeffizient korreliert eng mit dem Diffusionskoeffizient, der nach Chloridbeaufschlagung, Bohrmehlanalyse und Fitting gemäß Bild 3 ermittelt werden kann (Bild 6). Die Grundlagen des Migrationstests sind u.a. in /7/ beschrieben.

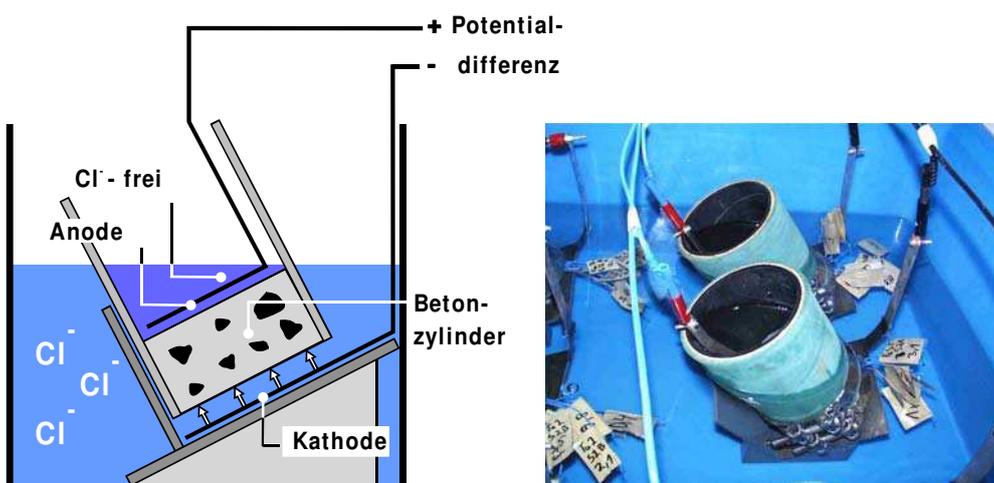


Bild 5: Schematischer Versuchsaufbau zur Durchführung von Migrationstests (li) sowie Darstellung der Versuchskörper (re)

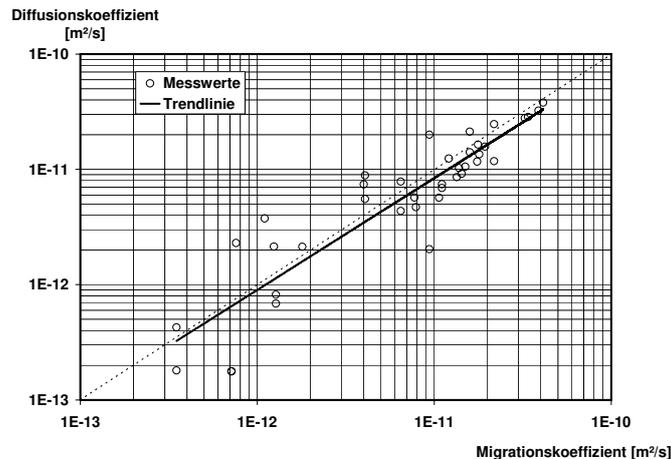
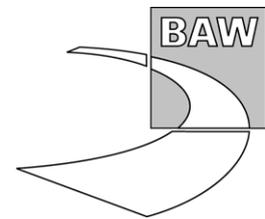


Bild 6: Zusammenhang von Chloridmigrationskoeffizient (bestimmt im Migrationstest) und Chloriddiffusionskoeffizient (bestimmt nach kontinuierlicher Chloridbeaufschlagung) /3/

Merkblatt „Chlorideindringwiderstand von Beton“ (Mai 2004)

Neben der oben beschriebenen Prüfmethode und einer detaillierten Durchführungsbeschreibung sind im Merkblatt „Chlorideindringwiderstand von Beton“ /6/ auch Anforderungen an Betone in Abhängigkeit der Exposition gestellt, die ein Beton erreichen muss, um eine ausreichende Dauerhaftigkeit von Meeresbauwerken und anderen Bauwerken in Chloridexposition zu gewährleisten. Untersuchungen am ibac haben gezeigt, dass Betone mit einer Betonrezeptur nach ZTV-W (LB 215, 2004) /5/ diese Anforderungen erfüllen (für Betone nach DIN 1045-2 ist dies ggf. nicht der Fall).

Für Instandsetzungssysteme wurde zur Abschätzung der Dauerhaftigkeit die Gleichung (1) für unterschiedliche Betondeckungen ausgewertet. Bild 7 zeigt hierfür beispielhaft die Auswertung für Betone mit einem Alterungskoeffizienten von 0,30: in Abhängigkeit des ermittelten Migrationskoeffizienten kann nun für bekannte Betondeckungen bzw. Schichtdicken von Instandsetzungssystemen der Zeitraum bis zur Depassivierung der Bewehrung und damit dem Beginn der Schädigungsphase (siehe Bild 1) abgeschätzt werden. Alternativ kann zum Erreichen einer geforderten Dauerhaftigkeit in Abhängigkeit der Betondeckung ein erforderlicher Migrationskoeffizient ermittelt werden.

Zu beachten ist hierbei, dass diese in Bild 7 dargestellte Abschätzung nur für die entsprechenden Eingangsparameter gilt. So sind bei höheren mittleren Temperaturen Betone mit niedrigeren Migrationskoeffizienten (entspricht dichteren Betonen) zu verwenden. Auch ist das Ansetzen eines Alterungskoeffizienten > 0 (d.h. der Beton dichtet mit der Zeit nach) ggfs. nachzuweisen.

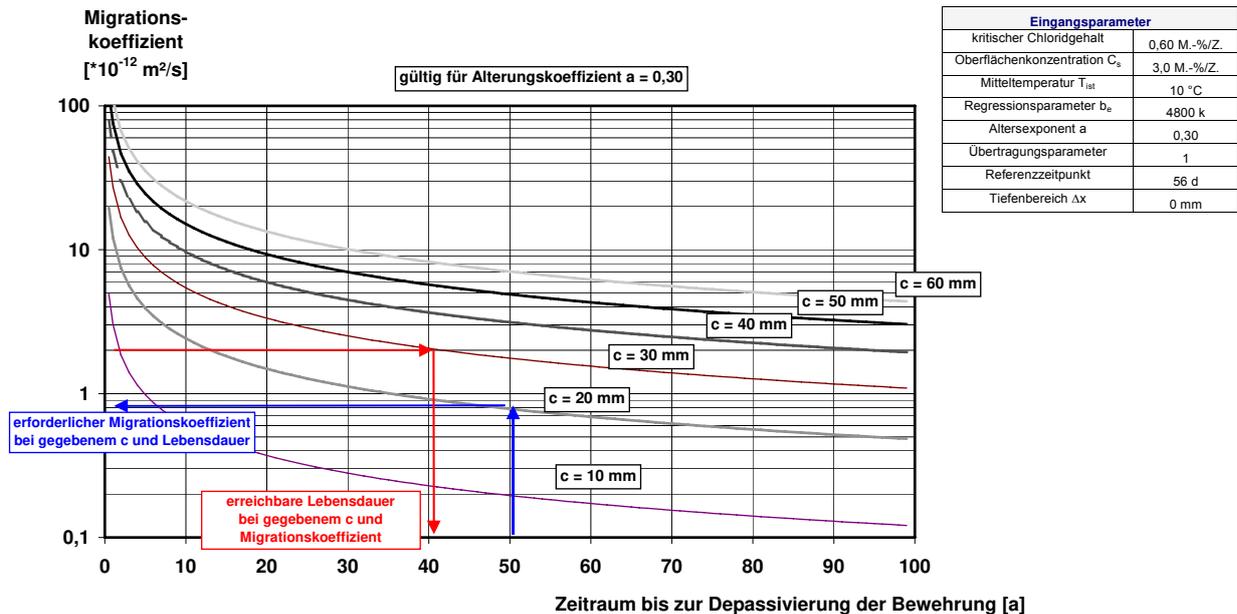
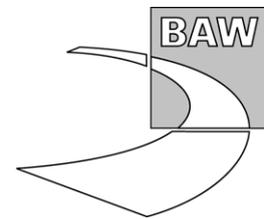


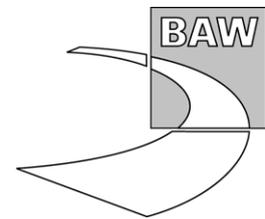
Bild 7: Abschätzung der Lebensdauer eines Bauwerks in Abhängigkeit der ermittelten Migrationskoeffizienten und der vorhandenen Betondeckung; bzw. Abschätzung der erforderlichen Migrationskoeffizienten

Zusammenfassung und Ausblick

In der vorliegenden Veröffentlichung werden zunächst die Grundlagen der Dauerhaftigkeitsbemessung hinsichtlich der chloridinduzierten Korrosion kurz vorgestellt. Anschließend werden die Ergebnisse mehrerer Forschungsvorhaben zur Dauerhaftigkeit von Instandsetzungssystemen und von Küstenbauwerken zusammengefasst und ein Einblick in die Modifizierung der neuen Regelwerke (ZTV-W) gegeben.

Von besonderer Bedeutung bei der zukünftigen Verwendung von Betonen und Mörteln in chloridhaltiger Exposition, insbesondere in der Wasserwechselzone, sind die in dem neu erarbeiteten BAW-Merkblatt „Chlorideindringwiderstand von Beton“ gemachten Vorgaben. In diesem Merkblatt sind der sogenannte Migrationsversuch ausführlich beschrieben und Anforderungen an Beton und Mörtel angegeben. Weiterhin sind Diagramme zur Bewertung der Ergebnisse des Migrationstests vorgestellt, mit deren Hilfe die Dauerhaftigkeit auch bei unterschiedlichen Betondeckungen bzw. Schichtdicken (bei Instandsetzungssystemen) abgeschätzt werden kann.

Die beschriebenen Veränderungen in den Regelwerken der BAW gehen einen entscheidenden Schritt in die Richtung eines zukünftigen Bemessungskonzeptes nach dem Performance-Konzept: der Einwirkungsseite (aus chloridhaltiger Exposition) wird eine Widerstandseite (z.B. der Chlorideindringwiderstand des Betons) gegenübergestellt und diese –ähnlich wie bereits heute bei der Tragwerksbemessung üblich- zu bemessen.



Literatur

- /1/ Raupach, M., Rößler, G. ; Dauberschmidt, C.: Instandsetzung von Meerwasserbauten. Aachen : Institut für Bauforschung, erscheint in Kürze
- /2/ Gehlen, C.: Probabilistische Lebensdauerermessung von Stahlbetonbauwerken : Zuverlässigkeitsbetrachtungen zur wirksamen Vermeidung von Bewehrungskorrosion. Berlin : Beuth. - In: Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (2000), Nr. 510
- /3/ Raupach, M. ; Dauberschmidt, C.: Dauerhaftigkeit von Küstenbauwerken : Anforderungen an Diffusionskoeffizienten von Betonen. Aachen : Institut für Bauforschung, 2004.- Forschungsbericht Nr. F 903
- /4/ Bundesminister für Verkehr ; BMV ; ZTV-W: Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen - Wasserbau (ZTV-W) für Schutz und Instandsetzung der Betonbauteile von Wasserbauwerken (Leistungsbereich 219) (Ausg: 1997) -
- /5/ Bundesminister für Verkehr ; BMV ; ZTV-W: Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen - Wasserbau (ZTV-W) für Wasserbauwerke aus Beton und Stahlbeton (Leistungsbereich 215). (Ausg: 02/2004) - WEISSDRUCK-VORVORLAGE
- /6/ Bundesanstalt für Wasserbau: Chlorideindringwiderstand von Beton (Entwurf), Merkblatt 05.2004
- /7/ Tang, L.: Chloride Transport in Concrete - Measurement and Prediction. Göteborg, Chalmers University of Technology, Diss., 1996