

Article, Published Version

**Rahimi, Amir**

## **Vereinfachtes Nachweiskonzept zur leistungsbezogenen Bemessung von Stahlbetonbauten hinsichtlich chloridinduzierter Betonstahlkorrosion**

BAWMitteilungen

---

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/102488>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Rahimi, Amir (2017): Vereinfachtes Nachweiskonzept zur leistungsbezogenen Bemessung von Stahlbetonbauten hinsichtlich chloridinduzierter Betonstahlkorrosion. In: BAWMitteilungen 100. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau. S. 7-23.

### **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.



# Vereinfachtes Nachweiskonzept zur leistungsbezogenen Bemessung von Stahlbetonbauten hinsichtlich chloridinduzierter Betonstahlkorrosion

## *Simplified Performance-Based Concept for the Service Life Design of Reinforced Concrete Structures Regarding Chloride-Induced Corrosion*

Dr.-Ing. Amir Rahimi, Bundesanstalt für Wasserbau

Die Dauerhaftigkeit neu zu errichtender Betonbauwerke wird nach derzeitigen Regelwerken deskriptiv maßgeblich durch die Einhaltung von Mindestanforderungen an Betonzusammensetzung und Betondeckung geregelt. Eine leistungsbezogene Bewertung nach dem Performance-Konzept, wie bei der Tragwerksbemessung, ist nicht gegeben. Dem zuverlässigkeitsbezogenen Konzept der DIN EN 1990 (2010) wird nicht Folge geleistet. Die vorhandenen vollprobabilistischen Bemessungskonzepte sind aufwändig und benötigen gesonderte Fachkenntnisse und spezielle numerische Software. In diesem Beitrag wird ein semiprobabilistisches Konzept vorgestellt, das eine Dauerhaftigkeitsbemessung hinsichtlich chloridinduzierter Betonstahlkorrosion für neu zu errichtende Bauteile ermöglicht. Durch Erstellung von Bemessungsnomogrammen wird dem sachkundigen Planer ein anwendungsfreundliches Instrument für ein transparentes Umgehen mit der Dauerhaftigkeit von Stahlbetonbauwerken bereitgestellt.

*Current standards deal descriptively with the durability of new concrete structures by specifying that such structures must satisfy certain minimum requirements in respect of the concrete composition and cover that are based on experience. Unlike for the structural design, no performance-based assessment in accordance with the performance concept exists. The reliability-based approach of DIN EN 1990 (2010) is not complied with. Applying the existing full-probabilistic concepts is time-consuming and demands specialist know-how as well as special numerical software. This paper introduces a semi-probabilistic concept that enables a durability design for new structural members in terms of the chloride-induced corrosion of the reinforcement. Design nomograms have been established to provide designers with an easy-to-use tool that allows the durability of reinforced concrete structures to be addressed in a transparent manner.*

### 1 Einleitung und Problemstellung *Introduction and problem*

Ein wesentlicher Teilaspekt der umgebungsbedingten Beanspruchungen auf Stahlbetonbauwerke ist die Chlorideinwirkung. Betroffen hiervon sind an den Bundeswasserstraßen beispielsweise Bauwerke in maritimer Umgebung wie Sperwerke und Kaianlagen, aber auch Bauwerke im Binnenbereich wie Brücken und Plattformen von Schleusen, die im Winter aus Gründen der Verkehrssicherheit mit Taumitteln behandelt werden. Dringen Chloride bis zur Betonstahloberfläche vor und erreichen dort eine kritische Konzentration, so wird die schützende Passivschicht des umhüllenden Betons beschädigt. Diese die Korrosion einleitende Phase (Initiierungsphase) verursacht noch keine Schäden am Bauwerk. Nur nach Verlust der Passivschicht kann der Betonstahl bei Vorhandensein bestimmter Randbedingungen (Feuchtigkeit, Sauerstoffzutritt) beginnen zu korrodieren (Schädigungsphase). Dieser Korrosionsprozess kann innerhalb kurzer Zeiträume zu einem signifikanten Querschnittsverlust des Betonstahls führen und ist visuell an der Bauteiloberfläche oftmals zunächst nicht erkennbar. In der weiteren Folge kann es zu Rissbildungen, Abplatzungen der Betondeckung und einem Verlust der Verbundwirkung zwischen Beton und Bewehrungsstahl mit gravierenden Folgen für die Gebrauchstauglichkeit und Tragfähigkeit der Konstruktion kommen.

Die derzeitige Normung, DIN EN 206 (2014) / DIN 1045-2 (2008) / DIN EN 1992-1 (2011) + NA (2013), regelt die Dauerhaftigkeit neu zu errichtender Betonbauwerke deskriptiv über die Einhaltung von bestimmten, auf Erfahrungswerten beruhenden Mindestanforderungen an Betonzusammensetzung und Betondeckung. Eine leistungsbezogene Bewertung nach dem Perfor-

mance-Konzept, wie bei der Tragwerksbemessung, ist nicht gegeben. Dem zuverlässigkeitsbezogenen Konzept der DIN EN 1990 (2010) wird nicht Folge geleistet. An bestehenden Bauwerken gesammelte Erfahrungen und Erkenntnisse zeigen, dass mit dem aktuellen deskriptiven Normungsansatz die angestrebten Nutzungsdauern hinsichtlich chloridinduzierter Betonstahlkorrosion nicht in jedem Fall mit ausreichender Wahrscheinlichkeit erreicht und teilweise sogar deutlich verfehlt werden.

Leistungsbezogene Entwurfsverfahren dürfen nach DIN EN 206 (2014) im Zusammenhang mit einem bauaufsichtlichen Verwendbarkeitsnachweis angewendet werden. Das einzig verfügbare geregelte Instrument zur Bemessung von einer Chlorideinwirkung ausgesetzten Bauteilen ist der im BAWMerkblatt „Chlorideindringwiderstand“, BAW (2012), beschriebene Bemessungsansatz. Der Materialwiderstand gegenüber dem Eindringen von Chloriden wird hier über einen Chloridmigrationsversuch bestimmt. Die Bewertung erfolgt dabei lediglich auf Basis des im frühen Alter ermittelten Materialwiderstands. Das entscheidende Langzeitverhalten des Materials bleibt ebenso unberücksichtigt wie die expositionsbedingten Gegebenheiten und die Konstruktion des Bauteils. Die vollprobabilistischen Bemessungskonzepte, insbesondere in fib (2006), ermöglichen eine begründete Dauerhaftigkeitsbemessung, sie sind jedoch aufwändig und benötigen gesonderte Fachkenntnisse und spezielle numerische Software.

Durch intensive Forschungsarbeiten der BAW in Kooperation mit dem Centrum Baustoffe und Materialprüfung (cbm) der TU München wurde ein semiprobabilistisches Nachweiskonzept zur Dauerhaftigkeitsbemessung von Stahlbetonbauteilen unter Chlorideinwirkung entwickelt, welches durch die Erstellung von Bemessungsnomogrammen vereinfacht wurde, Rahimi (2016). Somit steht Ingenieuren und sachkundigen Planern ein einfach handhabbares Instrument zur Verfügung, das eine transparente und leistungsbezogene Bemessung von Bauteilen ermöglicht, die unter Chlorideinwirkung stehen. In diesem Beitrag wird das entwickelte Nachweiskonzept für dessen praktische Anwendung vorgestellt und durch Fallbeispiele veranschaulicht. Die Hintergründe, Vorgänge und Abläufe zur Entwicklung des Konzeptes sind detailliert in Rahimi (2016) dokumentiert und erläutert.

## 2 Deskriptives und leistungsbezogenes Vorgehen zur Dauerhaftigkeitsbemessung von Betonbauwerken

### *Prescriptive and performance-based durability design of concrete structures*

Die Dauerhaftigkeit neu zu errichtender Betonbauwerke wird nach derzeitigen deutschen Regelwerken (z. B. DIN EN 206 (2014) / DIN 1045-2 (2008) / DIN EN 1992-1-1 (2011) + NA (2013) / ZTV-W LB 215 (2012) / ZTV-ING (2014)) deskriptiv maßgeblich durch die Einhaltung von Mindestanforderungen an Betonzusammensetzung und Betondeckung geregelt. Für Stahlbetonbauwerke unter Chlorideinwirkung sind Vorgaben zu folgenden Parametern einzuhalten:

- Maximaler Wasserzementwert,
- Mindestzementgehalt,
- höchstzulässiger Mehlkorngelinhalt,
- zugelassene Zementart,
- Mindestdruckfestigkeit,
- Mindestbetondeckung und ein zulässiges Vorhaltemaß,
- maximaler Eigenchloridgehalt des Betons und
- maximale Rissbreite.

Diese Parameter beschreiben den Widerstand des Betons und des Bauteils gegenüber einer möglichen Depassivierung des Betonstahls infolge des Eindringens von Chloriden aus der Umgebung. Die Mindestanforderungen an diese Parameter stehen in Abhängigkeit zu umgebungsbedingten Beanspruchungen. Die Intensität der Beanspruchung wurde durch eine Einteilung der Umgebung in Expositionsklassen definiert. Die Einteilung erfolgte in Abhängigkeit der anstehenden Chloridlösung in die Expositionsklassen XD (Taumittel) und XS (Meerwasser), welche je nach vorliegendem Korrosionsrisiko in drei weitere Untergruppen unterteilt wurden.

Für jede Expositionsklasse sind in DIN 1045-2 (2008), die zusammen mit DIN EN 206-1 (2001) die Leistungsfähigkeit des Betons in Deutschland regelt, Anforderungen an Betonzusammensetzung sowie Mindestdruckfestigkeit festgelegt worden. In DIN EN 1992-1-1 (2011) + NA (2013), die maßgebende deutsche Norm für die Bemessung von Stahlbetontragwerken, wurden für jede Expositionsklasse u. a. Anforderungen an die Mindest-

betondeckung festgelegt. Diesen Anforderungen liegt die Annahme einer beabsichtigten Nutzungsdauer von mindestens 50 Jahren unter üblichen Instandhaltungsbedingungen zugrunde.

Für Wasserbauwerke gemäß ZTV-W LB 215 (2012) werden im Hinblick auf angestrebte Nutzungsdauern von bis zu 100 Jahren ergänzende Anforderungen hinsichtlich der Ausgangsstoffe und der Betondeckung vorgegeben. Für Bauteile der Expositionsklassen XS2 und XS3 wird für Zielnutzungsdauern über 50 Jahren grundsätzlich eine Dauerhaftigkeitsbemessung gefordert, da solche Nutzungsdauern unter derartige Randbedingungen alleine mit deskriptiven Vorgaben nicht in jedem Fall erreicht werden können.

Die Mindestanforderungen der Normung beruhen neben wissenschaftlichen Erkenntnissen und Produktnormen von Betonausgangsstoffen im Wesentlichen auf nationalen Erfahrungen. Die in den einzelnen europäischen Ländern eingeführten Regeln bzw. die daraus resultierenden Beton- und Bauteilwiderstände sind nicht in jedem Fall vereinbar und einsichtig. Dies beweist u. a. eine Gegenüberstellung der deskriptiven Regeln der europäischen Länder und der daraus resultierenden Zuverlässigkeiten in fib (2015).

Anders als beim deskriptiven Ansatz wird bei einer leistungsbezogenen (performance-based) Dauerhaftigkeitsbemessung der potenzielle Beton- und Bauteilwiderstand ermittelt und den erwarteten umgebungsbedingten Beanspruchungen gegenübergestellt, Bild 1.

Um eine leistungsbezogene Bewertung und Bemessung der Dauerhaftigkeit zu ermöglichen, wurden ab Mitte der 1980er-Jahre probabilistische Prognosemodelle auf Performance-Basis entwickelt. Diese Performance-Konzepte setzen folgende Grundinformationen für eine realistische Abschätzung der Dauerhaftigkeit voraus:

- Definition von Grenzzuständen,
- Mathematische Modelle zur Beschreibung der zeitabhängigen Schädigungsmechanismen und Transportvorgänge,
- Statistische Quantifizierung der orts- und zeitabhängigen Einwirkungen,
- Messung und statistische Quantifizierung der Bauteilwiderstände,

- Annahme angemessener Eintretenswahrscheinlichkeiten im Hinblick auf ungewollte Bauteilzustände (Versagen).

Für den Fall des ungewollten Bauteilzustandes „Depassivierung des Betonstahls infolge einer Chlorideinwirkung“ wurde ein vollprobabilistisches Performance-Konzept für die Dauerhaftigkeit von Betonbauteilen im intakten Bereich (ohne Risse) entwickelt, Gehlen (2000), welches international in die praktische Bemessung Eingang fand. Dem in fib (2006) und später in fib (2010) sowie in ISO 16204 (2012) veröffentlichten Bemessungsmodell liegt der Grenzzustand zugrunde, dass die Depassivierung der Betonstahloberfläche auszuschließen ist. Die Betonstahloberfläche wird depassiviert, wenn ein kritischer Chloridgehalt an der Oberfläche des Betonstahls erreicht wird. Die Grenzzustandsgleichung  $g(X, t)$  kann demnach wie folgt formuliert werden:

$$g(X, t) = C_{crit} - C(c, t_{SL}) \quad (1)$$

Darin sind:

- $C_{crit}$ : kritischer korrosionsauslösender Chloridgehalt [M.-%/b]
- $C(c, t_{SL})$ : Chloridgehalt an der Betonstahloberfläche zum Zeitpunkt  $t_{SL}$  [M.-%/b], welcher mit Hilfe der Formel in der Gleichung (4), Abschnitt 3.2, berechnet wird
- $c$ : Betondeckung [m]
- $t_{SL}$ : Nutzungsdauer (Service Life) [Jahr]

Der kritische korrosionsauslösende Chloridgehalt  $C_{crit}$  ist ein Schwellenwert, der vielen Einflussfaktoren unterliegt. Diese Variable wird im Modell neben den restlichen Parametern stochastisch (mit einem Mittelwert von 0,6 M.-% bezogen auf den Bindemittelgehalt) berücksichtigt.

Die Einschränkung des Grenzzustandes auf die Initiierung der Korrosion liegt darin begründet, dass derzeit keine bewährten Modelle existieren, die die Schädigungsphase der Korrosion nach der Depassivierung des Betonstahls bis zur Rissbildung, Abplatzung der Betondeckung oder bis zum Versagen des Bauteils abschätzen können.

Die Ermittlung der zeit- und tiefenabhängigen Chloridkonzentration im Betonbauteil erfolgt durch ein

mathematisches Modell (s. Abschnitt 3.2). Als Variablen der Einwirkung werden das Chloridgebot der umgebenden Chloridquelle und die Umgebungstemperatur als stochastische Parameter berücksichtigt. Als Variablen des Widerstands sind gemessene Chlorideindringwiderstände des Betons zusammen mit Betondeckungsmaßen zu betrachten (stochastisch). In Abhängigkeit vom erforderlichen Aufwand zur Risikominimierung wird eine maximale Eintretens- oder Versagenswahrscheinlichkeit für den berücksichtigten Grenzzustand angenommen. Für die Berechnung der Versagens-, besser Eintrittswahrscheinlichkeit  $p_f$ , ist ein Faltungsintegral zu lösen, welches in der Regel analytisch nicht lösbar ist. Kommerzielle Computerprogramme (z. B. STRUREL) bieten zu diesem Zweck Simulationsverfahren und Methoden der strukturellen Zuverlässigkeitsanalyse, z. B. Näherungsverfahren wie FORM (First Order Reliability Method) oder SORM (Second Order Reliability Method), an. Anstelle der Eintrittswahrscheinlichkeit  $p_f$  kann dabei auch der Zuverlässigkeitsindex  $\beta$  angegeben werden. Bei normalverteilten Zufallsvariablen stehen Eintrittswahrscheinlichkeit und Zuverlässigkeitsindex in folgendem Zusammenhang ( $\phi(\cdot)$  ist die Funktion der Standardnormalverteilung), siehe auch Bild 1:

$$\beta = \phi^{-1}(p_f) \quad (2)$$

### 3 Nachweiskonzept mit Hilfe von Bemessungsnomogrammen *Design by means of nomograms*

#### 3.1 Bemessungsnomogramme *Design nomograms*

Die Anwendung vollprobabilistischer Nachweiskonzepte bedarf gesonderter Fachkenntnisse und spezieller numerischer Software. Deshalb finden derartige Konzepte keine breite Anwendung in der Praxis. Vollprobabilistische Konzepte können auf ein semiprobabilistisches Format vereinfacht werden, indem die Modellvariablen nicht mehr als statistisch verteilte charakteristische Größen berücksichtigt werden, sondern mit Bemessungswerten. Die Bemessungswerte entstehen durch die Berücksichtigung der charakteristischen Werte der Variablen, i. d. R. Mittelwerte, mit multiplikativen oder additiven Teilsicherheitsbeiwerten. Die Teilsicherheitsbeiwerte berücksichtigen die möglichen ungünstigen Abweichungen der tatsächlichen Einwirkungs-, Widerstands- und Geometriegrößen von den charakteristischen Werten sowie die Modellunsicherheiten. Die Größen der Teilsicherheitsbeiwerte werden so gewählt, dass die Zielzuverlässigkeit beim Überschreiten des Grenzzustands innerhalb der geplanten Nutzungsdauer stets eingehalten wird. Sie wurden für das vorliegende Konzept auf Basis vollprobabilistischer Bemessungen abgeleitet.

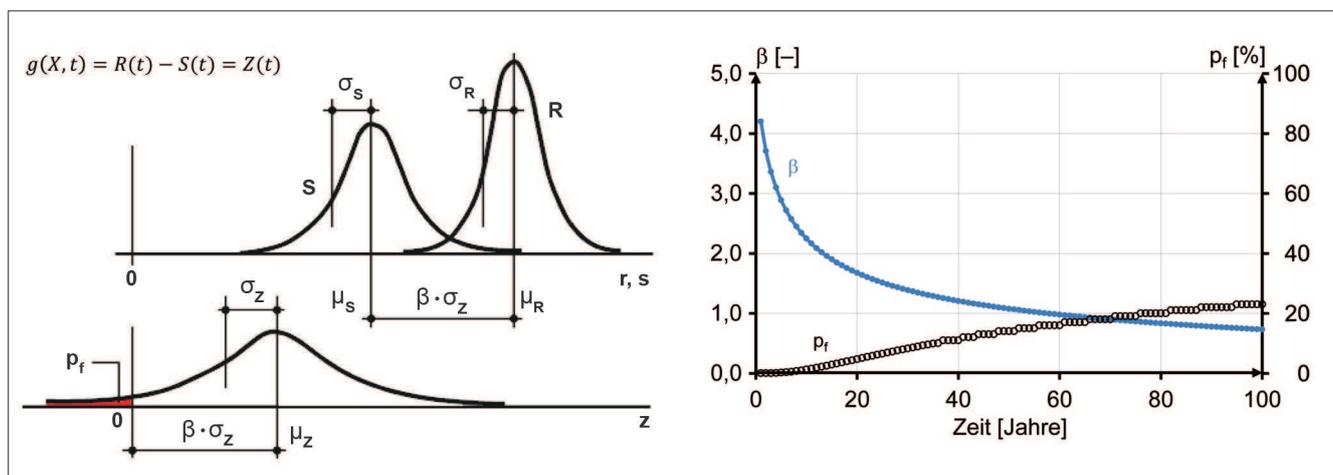


Bild 1: Links: Gegenüberstellung von Einwirkung  $S(t)$  und Widerstand  $R(t)$  (gestreut und zeitabhängig) in der Grenzzustandsgleichung  $g(X, t)$  und der Zusammenhang zwischen Versagenswahrscheinlichkeit  $p_f$  und Zuverlässigkeitsindex  $\beta$  (aus Schneider (2007)); rechts: exemplarischer Verlauf von  $p_f$  und  $\beta$  über der Zeit

Figure 1: Left: Comparison of action  $S(t)$  and resistance  $R(t)$  in the limit state equation  $g(X, t)$  and relationship between the probability of failure  $p_f$  and the reliability index  $\beta$  (from Schneider (2007)); right: typical development of  $p_f$  and  $\beta$  over time

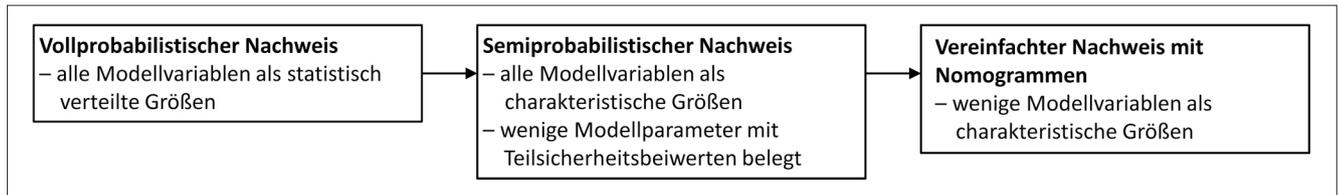


Bild 2: Nachweisformate und ihr Zusammenhang  
 Figure 2: Design formats and the relationship between them

Um einer Auseinandersetzung mit komplexen Gleichungen zu umgehen und die Bemessung möglichst einfach zu gestalten, wurden aus dem semiprobabilistischen Nachweisformat Bemessungsnomogramme entwickelt. Beim Nachweisformat mit Nomogrammen wird der funktionale Zusammenhang zwischen den gewichteten Modellvariablen aus dem semiprobabilistischen Nachweisformat graphisch dargestellt, wobei nur eine stark reduzierte Anzahl der Modellvariablen berücksichtigt wird. Die Nachweisformate und ihr Zusammenhang sind im Bild 2 dargestellt.

Als Bemessungswerte wurden im semiprobabilistischen Nachweisformat die wichtigsten Variablen des

Materialwiderstands, der Einwirkung und der Geometrie des Bauteils ausgewählt, welche dann die Ein- und Ausgangsparameter der Bemessungsnomogramme darstellen. Ein Bemessungsnomogramm ist beispielhaft im Bild 3 dargestellt. Darin beschreiben die Parameterpaare  $D_{RCM}(t_0)$  und  $\alpha_{RCM}$  bzw.  $D_{nss}(t_0)$  und  $\alpha_{nss}$  bzw.  $D_{nss}(t_0)$  und  $\alpha_{app}$  den Materialwiderstand gegenüber Chlorideindringen,  $C_{S, Ax}$  die Einwirkung und  $c_{min}$  die Mindestbetondeckung des Bauteils für eine Zielnutzungsdauer von  $t_{SL} = 50$  Jahren und für eine Zielzuverlässigkeit von  $\beta_0 = 1,5$  für die Expositionsklassen XS3 und XD3. Die Parameter der Nomogramme werden in den nächsten Abschnitten erläutert.

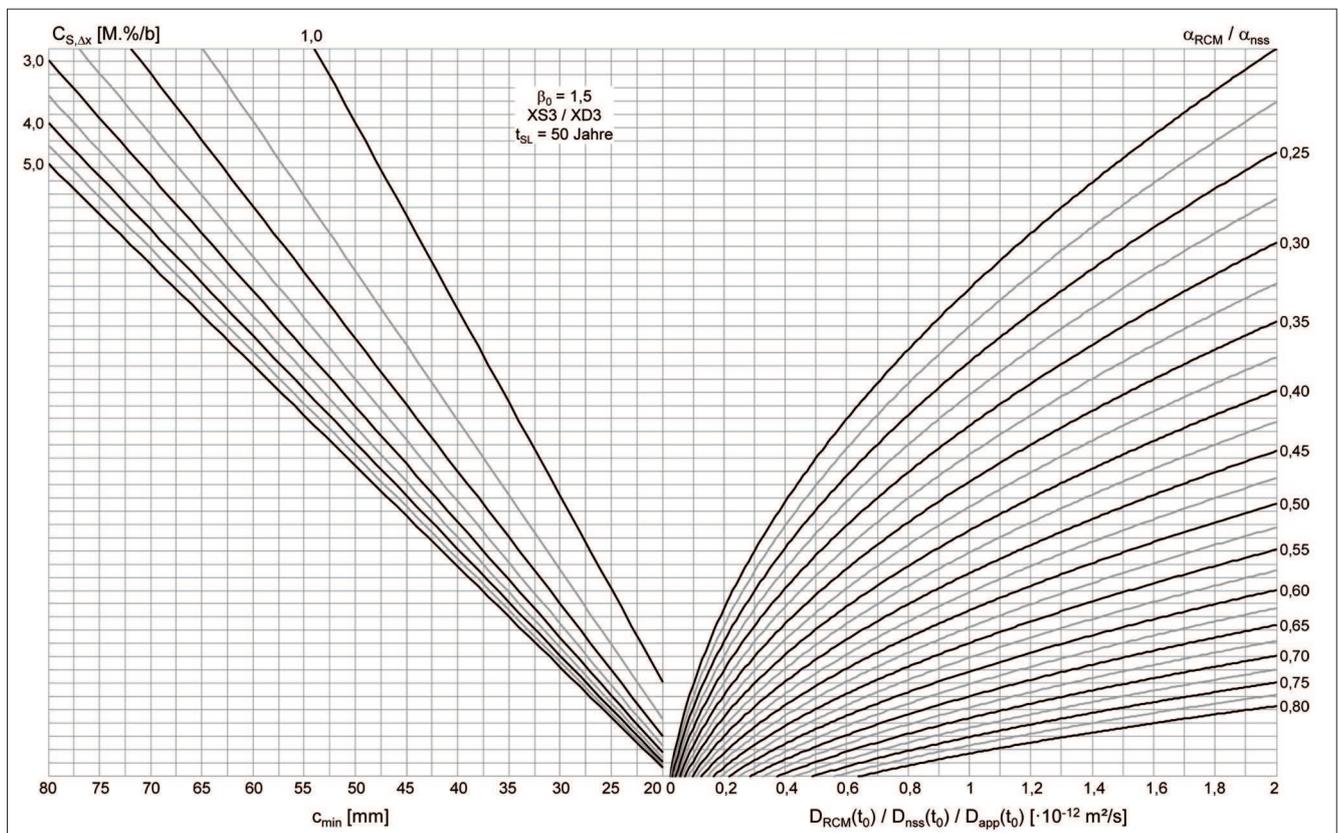


Bild 3: Beispielhaftes Bemessungsnomogramm zur Dauerhaftigkeitsbemessung von Bauteilen hinsichtlich chlorid-induzierter Betonstahlkorrosion (Nomogramm-Nr. N.5 aus Tabelle 1)  
 Figure 3: Exemplarily design nomogram for the service life design of concrete structures regarding chloride-induced corrosion (nomogram no. N.5 from Table 1)

Zielwert des Zuverlässigkeitsindex $\beta_0$	Zielnutzungsdauer $t_{SL}$	Nomogramm-Nr.		
		$D_{RCM}(t_0)$ bzw. $D_{nss}(t_0)$ [ $\cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ ] <sup>2)</sup>		
		0 - 2	2 - 20	0 - 20
1,5	100	N.1	N.2	
	70	N.3	N.4	
	50	N.5	N.6	
	40	N.7	N.8	
	30	N.9	N.10	
	20			N.11
	10			N.12
0,5	100			N.13
	70			N.14
	50			N.15
	40			N.16
	30			N.17
	20			N.18
	10			N.19

<sup>1)</sup> für die Expositionsklassen XS2 / XD2 können dieselben Nomogramme verwendet werden, wenn die Mindestbetondeckung als **Ausgangsparameter** um den Betrag 10 mm (Konvektionszone  $\Delta x$ ) verringert wird, d. h.  $c_{min} - 10 \text{ mm}$ . Falls jedoch die Mindestbetondeckung als **Eingangsparameter** verwendet wird, ist diese um 10 mm zu erhöhen, d. h.  $c_{min} + 10 \text{ mm}$ .

<sup>2)</sup> teilweise Aufteilung in den Bereichen 0 bis 2  $\text{m}^2/\text{s}$  und 2 bis 20  $\text{m}^2/\text{s}$  für eine bessere Lesbarkeit der Nomogramme

Tabelle 1: Übersicht über die Nomogramme zur Dauerhaftigkeitsbemessung für die Expositionsklassen XS3 / XD3<sup>1)</sup>  
 Table 1: Overview of nomograms for the service life design of structures in exposure classes XS3 and XD3<sup>1)</sup>

Aufgrund der Zeitabhängigkeit des Materialwiderstands gegenüber Chlorideindringen kann eine Variation der Zielnutzungsdauer durch zusätzliche unterschiedliche Kurvenschare nicht in den Nomogrammen berücksichtigt werden. Somit wurden in Rahimi (2016) Nomogramme für Zielnutzungsdauern von 10, 20, 30, 40, 50, 70 und 100 Jahren erstellt. Tabelle 1 gibt eine Übersicht über die insgesamt 19 Nomogramme, die in Abhängigkeit der geforderten Zuverlässigkeit und der Zielnutzungsdauer für eine Bemessung verwendet werden können. Für eine bessere Lesbarkeit der Nomogramme wurde der Parameter  $D_{RCM}(t_0)$  bzw.  $D_{nss}(t_0)$  zum Teil in zwei Bereichen 0 bis 2  $\text{m}^2/\text{s}$  und 2 bis 20  $\text{m}^2/\text{s}$  separiert.

Nachfolgend wird das verwendete Modell zur zeit- und tiefenabhängigen Berechnung des Chloridgehalts im Beton vorgestellt und erläutert.

### 3.2 Modellierung des Chloridtransports im Beton

#### Modelling the chloride transport in concrete

Das Chlorideindringen in Beton ist mit verschiedenen physikalischen und chemischen Prozessen verbunden. Das Ziel der Modellierung ist hier, das Resultat dieser Prozesse, nämlich die sich einstellenden Chloridprofile, mittels aus ingenieurpraktischer Sicht zumutbaren Aufwands mit ausreichender Genauigkeit abzubilden.

Die erste Modellierung des Chloridtransports im Beton erfolgte durch Collepardi et al. (1970). Das als zweites Fick'sches Diffusionsgesetz bekannte Modell ist in Gleichung (3) in seiner ursprünglichen Form als Differentialgleichung dargestellt.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \tag{3}$$

Darin ist  $D$  der Chloriddiffusionskoeffizient des Betons [ $\text{m}^2/\text{s}$ ], der als konstante Größe, d. h. unabhängig von der Zeit, angenommen wurde.

Gleichung (4) zeigt das in fib (2006) beschriebene Ingenieurmodell, die etwas vereinfacht, aber modellierungstechnisch ergänzt, die Lösung der Differentialgleichung (3) zum Fick'schen Diffusionsgesetz darstellt:

$$C(x, t) = C_0 + (C_{s, \Delta x} - C_0) \cdot \operatorname{erfc} \frac{x - \Delta x}{2 \cdot \sqrt{D_{app}(t) \cdot t}} \quad (4)$$

Darin sind:

- $C(x, t)$ : Chloridkonzentration in der Tiefe  $x$  zum Zeitpunkt  $t$  in Massenprozent bezogen auf den Bindemittelgehalt [M.-%/b]
- $C_0$ : Eigenchloridgehalt des Betons [M.-%/b] (bei  $C_0 < 0,1$  M.-%/b wird dieser Parameter gleich Null gesetzt)
- $C_{s, \Delta x}$ : Chloridkonzentration in der Tiefe  $\Delta x$  (bei  $\Delta x = 0$  an der Bauteiloberfläche) zum Beobachtungszeitpunkt in Abhängigkeit der anstehenden Chloridquelle, welche als konstante Einwirkung angenommen wird (Oberflächenchloridkonzentration) [M.-%/b]
- $x$ : Tiefe mit einem korrespondierenden Chloridgehalt  $C(x, t)$  [m]
- $\Delta x$ : Tiefenbereich, in dem ggf. das Chlorideindringverhalten durch intermittierende Chlorideinwirkung vom Fick'schen Verhalten abweicht [m]
- $t$ : Betonalter [s]
- $D_{app}(t)$ : scheinbarer (apparent) Chloriddiffusionskoeffizient des Betons [ $\text{m}^2/\text{s}$ ], Größenordnung abhängig von der Auslagerungszeit. Variable wird jedoch bei allen Berechnungen für den gesamten betrachteten Zeitraum von  $t_{exposition} (\sim 0)$  bis  $t$  als Konstante angesetzt.
- $\operatorname{erfc}$ : Komplementäre der Gauß'schen Fehlerfunktion (= 1-erf)

Für Bauteile unter zyklischen Chloridbelastung, wie zum Beispiel Verkehrsflächen (Taumittelbehandlung im Winter) (XD3), aber auch im Wasserwechsel- und Spritzwasserbereich von Küstenbauwerken (XS3), kann der Chloridtransport in den oberflächennahen Bereichen jedoch vom Fick'schen Diffusionsgesetz stark abweichen. Für diesen Fall wurde von Gehlen

(2000) die Ersatz-Oberflächenchloridkonzentration  $C_{s, \Delta x}$  eingeführt. Die Chloridkonzentrationen innerhalb der Konvektionszone  $\Delta x$  werden auf der sicheren Seite liegend vernachlässigt.

Der Materialwiderstand wird durch den Parameter scheinbarer Chloriddiffusionskoeffizient  $D_{app}(t)$  berücksichtigt.  $D_{app}(t)$  nimmt mit zunehmender Auslagerungszeit (Betonalter) verschiedene Größenordnungen an. Mit zunehmenden Betrachtungszeiträumen nimmt die Größenordnung des scheinbaren Diffusionskoeffizienten ab, d. h., i. d. R.  $D_{app}(t_2) < D_{app}(t_1)$  mit  $t_2 > t_1$ . Für die einzelne Berechnung wird der scheinbare Chloriddiffusionskoeffizient als konstante Eingangsvariable eingeführt, welche eine Art gemittelten Chloriddiffusionskoeffizienten über den betrachteten Zeitraum darstellt. Die Möglichkeiten zur Beschreibung dieser Variable des Materialwiderstands werden im folgenden Abschnitt beschrieben.

### 3.3 Ermittlung des scheinbaren Chloriddiffusionskoeffizienten $D_{app}(t)$ *Appraisal of the apparent chloride diffusion coefficient $D_{app}(t)$*

Gleichung (5) zeigt die allgemeine Formulierung des scheinbaren Chloriddiffusionskoeffizienten  $D_{app}(t)$ :

$$D_{app}(t) = D_{test}(t_0) \cdot \left( \frac{t_0}{t} \right)^\alpha \quad (5)$$

Der Parameter  $D_{test}(t_0)$ , welcher den Widerstand des Betons (i. Allg. des Produkts) gegen Chlorideindringen zum Zeitpunkt  $t_0$  darstellt, wird in der Regel durch das Fitting von Chloridprofilen aus bestehenden Bauwerken oder Laborkurzzeitprüfungen in die Gleichung (4) ermittelt. Dies erfolgt durch eine Regressionsanalyse, in der die Abweichungen ( $v_i$ ) zwischen berechneten und gemessenen Werten minimiert werden (Methode der kleinsten Fehlerquadrate), vgl. Bild 4. Das Ergebnis der Regressionsanalyse ist das Wertepaar  $D_{test}(t_0)$  und Oberflächenchloridkonzentration  $C_{s,0}$  bzw. Chloridkonzentration in der Tiefe  $\Delta x$  (Konvektionszone)  $C_{s, \Delta x}$ . Der Chloridgehalt kann dabei sowohl bezogen auf die Zementmasse  $z$  (bzw. äquivalente Zementmasse  $z_{eq}$  bzw. Bindemittelmasse  $b$ ) als auch auf die Masse der Mehlsprobe (u. a. bei unbekannter Zusammensetzung des Materials) berücksichtigt werden.

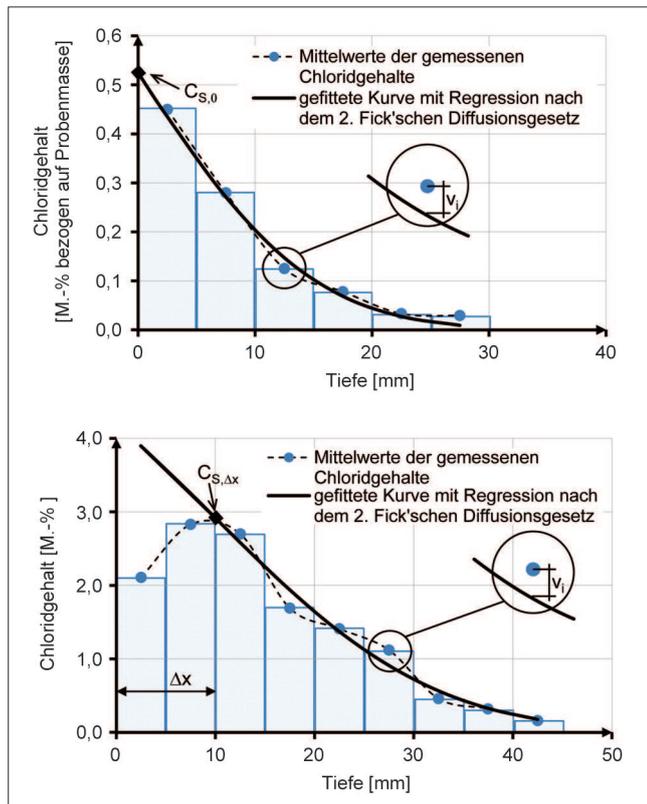


Bild 4: Ermittlung von  $D_{test}(t_0)$  und  $C_{S,0}$  bzw.  $C_{S,\Delta x}$  anhand Chloridprofile aus bestehenden Bauwerken oder Laborkurzzeitversuchen

Figure 4: Determination of  $D_{test}(t_0)$ ,  $C_{S,0}$  and  $C_{S,\Delta x}$  by means of chloride profiles of existing structures or short-time laboratory tests

Mit dem zweiten Parameter des scheinbaren Chlorid-diffusionskoeffizienten, dem Altersexponenten  $\alpha$ , wird das Langzeitverhalten des zu untersuchenden Produkts beschrieben.

Die Größe des Altersexponenten gibt die Intensität der zeitlichen Abnahme von  $D_{app}(t)$  an. Im Gegensatz zu  $D_{test}(t_0)$  kann der Altersexponent nicht anhand einer einzelnen Laborprüfung ermittelt werden. Die Abschätzung dieses Parameters erfolgt durch das Heranziehen von Bauwerksdaten und/oder durch Betrachtung der zeitlichen Entwicklung von  $D_{app}(t)$  anhand Laborprüfungen über einen längeren Zeitraum.

Die Kenngröße  $D_{app}(t)$  als Variable des Materialwiderstands kann in Abhängigkeit des einzusetzenden Produkts, der Informationsstände, des realisierbaren Zeit- und Kostenaufwands und der notwendigen Zuverlässigkeit nach folgenden drei Ansätzen für die Dauerhaftigkeitsbemessung berechnet werden, welche in Tabelle 2 zusammengefasst sind.

	Ansatz A	Ansatz B	Ansatz C
Prüfverfahren / Hilfsmittel	Diffusionsversuche	RCM-Versuch + (große) Bauwerksdaten; Altersexponent kann aus der Literatur abgelesen werden	Diffusionsversuch + (vereinzelte) Bauwerksdaten
Anwendungsfälle	neue Produkte mit fehlender Erfahrungsbasis, Produkte mit unbekannter Zusammensetzung	Herkömmliche Produkte mit vorhandener Erfahrungsbasis und bekannter Zusammensetzung	Bauwerksdaten entsprechend dem Design-Produkt und der Design-Exposition vorhanden
Aufwand	sehr hoch	sehr gering	mittel
Versuchsdauer <sup>1)</sup>	mind. zwei Jahre	ca. 5 Wochen	ca. 9 Wochen
Formel	$D_{app,A}(t) = k_e \cdot D_{nss}(t_0) \cdot \left(\frac{t_0}{t}\right)^{\alpha_{nss}}$	$D_{app,B}(t) = k_e \cdot D_{RCM}(t_0) \cdot \left(\frac{t_0}{t}\right)^{\alpha_{RCM}}$	$D_{app,C}(t) = k_e \cdot D_{nss}(t_0) \cdot \left(\frac{t_0}{t}\right)^{\alpha_{app}}$
<sup>1)</sup> von der Herstellung der Probekörper bis zur Gewinnung der Ergebnisse, d. h. Messung der Eindringtiefen bei RCM oder chemische Analyse der Mehlproben bei Diffusionsversuch			

Tabelle 2: Ansätze zur Ermittlung des scheinbaren Chlorid-diffusionskoeffizienten  $D_{app}(t)$  für die Modellierung des Chloridtransports im Beton und Dauerhaftigkeitsbemessung von Betonbauteilen

Table 2: Approaches for determining the apparent chloride diffusion coefficient  $D_{app}(t)$  for modelling the chloride transport in concrete and the service life design

**Ansatz A: Ermittlung des Materialwiderstands  $D_{app}(t)$  mittels Diffusionsversuche**

Der scheinbare Chloriddiffusionskoeffizient  $D_{app}(t)$  wird in diesem Ansatz durch die Ermittlung der Parameter  $D_{nss}(t_0)$  und  $\alpha_{nss}$  mittels Diffusionsversuche in Anlehnung an DIN EN 12390-11 (2015) charakterisiert und anhand folgender Gleichung berechnet:

$$D_{app,A}(t) = k_e \cdot D_{nss}(t_0) \cdot \left(\frac{t_0}{t}\right)^{\alpha_{nss}} \quad (6)$$

Darin sind:

$D_{nss}(t_0)$ : instationärer (non-steady state) Chloriddiffusionskoeffizient [m<sup>2</sup>/s] nach dem einseitigen Diffusionsversuch in Anlehnung an DIN EN 12390-11 (2015)

$t_0$ : Referenzzeitpunkt; Dauer der Beaufschlagung des Prüfkörpers mit Chloridlösung im Diffusionsversuch ( $t_0 = 28$  d)

$\alpha_{nss}$ : Altersexponent [-], ermittelt durch Diffusionsversuche in Anlehnung an DIN EN 12390-11 (2015)

$D_{app,A}(t)$ : scheinbarer Chloriddiffusionskoeffizient [m<sup>2</sup>/s] nach Ansatz A

$k_e$ : Umweltparameter zur Berücksichtigung der Umgebungstemperatur [-]

Der Diffusionsversuch ist an Prüfkörpern durchzuführen, welche nach der Herstellung zur Nachbehandlung 28 Tage unter Wasser gelagert worden sind. Der instationäre Chloriddiffusionskoeffizient  $D_{nss}(t_0)$  wird durch Beprobung der Prüfkörper nach  $t_0 = 28$  Tagen Beaufschlagung mit Chloridlösung und Erstellung der Chloridprofile ermittelt. Zur Ermittlung des Altersexponenten  $\alpha_{nss}$  sind der Diffusionsversuch an den Prüfkörpern für insgesamt mindestens zwei Jahre durchzuführen und Chloriddiffusionskoeffizienten zu mindestens drei weiteren Zeitpunkten (nach ca. 90, 365 und 730 Tagen Beaufschlagung mit Chloridlösung) zu ermitteln. Die zeitliche Entwicklung des Chloriddiffusionskoeffizienten  $D_{nss}$  eines Materials ist exemplarisch in Bild 5 in normaler und doppel-logarithmischer Skalierung dargestellt. Der Altersexponent  $\alpha_{nss}$  wird durch eine Regressionsanalyse quantifiziert. Die Regressionsfunktion (Potenz:  $y = a \cdot x^a$ ) und das Bestimmtheitsmaß  $R^2$  sind in Bild 5 angegeben. Der Exponent der Regressionsfunktion ergibt den Altersexponenten  $\alpha_{nss}$  (hier  $\alpha_{nss} \sim 0,35$ ).

Die Betrachtung der zeitlichen Entwicklung des instationären Chloriddiffusionskoeffizienten über mindestens zwei Jahre lehnt sich an den aktuellen Stand der Arbeiten von JWG aus TC 104 / SC1 und TC 250 / SC2 (siehe Leivestad (2014)) an, die sich mit der Entwicklung von Performance-orientierten Ansätzen für die Dauerhaftigkeitsbemessung von Stahlbetonbauwerken befassen. Die Wahl der Untersuchungsdauer von zwei Jahren ist ein Kompromiss zwischen der notwendigen Genauigkeit und dem zeitlichen und wirtschaftlichen Aufwand.

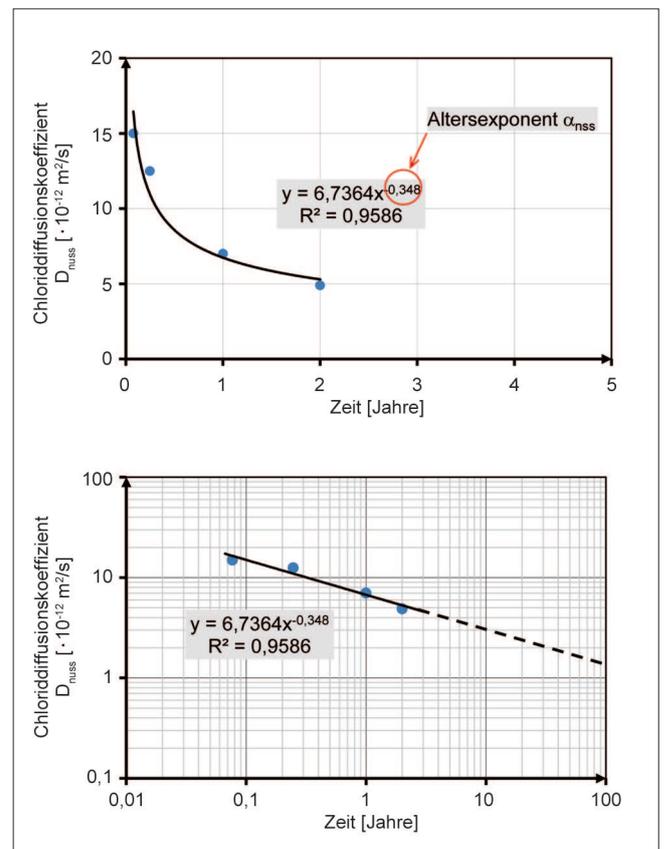


Bild 5: Exemplarische Ermittlung des Altersexponenten  $\alpha_{nss}$  mittels Regressionsanalyse an Chloriddiffusionskoeffizienten  $D_{nss}$ . Die einzelnen ausgewiesenen Chloriddiffusionskoeffizienten repräsentieren den Materialwiderstand für unterschiedlich lange Expositionszeiten ( $t_0 = 28$  d,  $t_1 = 90$  d,  $t_2 = 365$  d und  $t_3 = 730$  d) jeweils als konstante Größe über den betrachteten Zeitraum. Zeitliche Entwicklung des  $D_{nss}$  in normaler (oben) und doppel-logarithmischer (unten) Skalierung.

Figure 5: Determination of the aging exponent  $\alpha_{nss}$  by means of regression analyses of chloride diffusion coefficients  $D_{nss}$ . The individual chloride diffusion coefficients represent the resistance of the material to chloride solution ( $t_0 = 28$  d,  $t_1 = 90$  d,  $t_2 = 365$  d and  $t_3 = 730$  d) for different exposure durations as a constant value over the respective time period. Development of  $D_{nss}$  over time on a normal (top) and double-logarithmic (bottom) scale.

Mit den ermittelten Parametern  $D_{nss}(t_0)$  und  $\alpha_{nss}$  wird schließlich im Rahmen der Dauerhaftigkeitsbemessung der Chloriddiffusionskoeffizient  $D_{app}(t)$  für lange Zeiträume von bis zu  $t = 100$  Jahren extrapoliert.

Der so ermittelte Altersexponent  $\alpha_{nss}$  ist entsprechend den Angaben in fib (2010) zwischen 0,20 und 0,80 einzugrenzen.

Das Fick'sche Diffusionsgesetz folgt thermodynamischen Gesetzen. Mit dem Umweltparameter  $k_e$  wird der Einfluss der Umgebungstemperatur auf die Chlorideindringrate in Betonbauteilen berücksichtigt. Dies erfolgt vereinfachend mit Hilfe der Arrhenius-Gleichung, wie folgt:

$$k_e = \exp\left(b_e \cdot \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T_{real}}\right)\right) \quad (7)$$

Darin sind:

- $b_e$ : Temperaturkoeffizient [-]; Regressionsparameter proportional zur Aktivierungsenergie des Materials
- $T_{ref}$ : Referenztemperatur (i. d. R. 293 K (20 °C)) [K]
- $T_{real}$ : Temperatur der Bauteiloberfläche oder die Umgebungstemperatur [K]
- $exp$ : Exponentialfunktion ( $e^x$ )

Im Ansatz A zur Ermittlung des  $D_{app}(t)$  mit Hilfe von Diffusionsversuchen ist der Umweltparameter  $k_e = 1,0$ , da die Laborversuche beim Referenztemperatur von 20 °C durchgeführt werden. Bei den Ansätzen B und C (s. u.) kann für die Variable  $T_{real}$  die mittlere Jahrestemperatur der umgebenden Luft aus der nächstgelegenen Wetterstation angesetzt werden. Bei einer mittleren Jahrestemperatur von etwa 10 °C für Deutschland beträgt der Umweltparameter  $k_e = 0,561$  (Mittelwert).

Dieser Ansatz eignet sich insbesondere für Produkte mit unbekannter Zusammensetzung oder mit bislang unzureichendem Praxiseinsatz. Für herkömmliche Betone und Produkte, für die ihr Langzeitverhalten hinsichtlich Chlorideindringwiderstand durch Bauwerksdaten nachweisbar ist, kann der im folgenden Abschnitt beschriebene Ansatz B eingesetzt werden.

### Ansatz B: Ermittlung des Materialwiderstands $D_{app}(t)$ mittels Migrationsversuchs und Daten aus bestehenden Bauwerken

In DuraCrete (1998) und Gehlen (2000) wurde eine Methodik zur Ermittlung des  $D_{app}(t)$  entwickelt, in der zum einen Bauwerksdaten zur Ermittlung des Altersexponenten herangezogen werden, und zum anderen der Materialwiderstand zum Referenzzeitpunkt  $D_{test}(t_0)$  mittels einen Laborschnelltests bestimmt wird. Der scheinbare Chloriddiffusionskoeffizient  $D_{app}(t)$  wird in diesem Ansatz anhand Gleichung (8) berechnet:

$$D_{app,B}(t) = k_e \cdot D_{RCM}(t_0) \cdot \left(\frac{t_0}{t}\right)^{\alpha_{RCM}} \quad (8)$$

Darin sind:

- $D_{RCM}(t_0)$ : Chloridmigrationskoeffizient [ $m^2/s$ ] nach dem Schnellchloridmigrationstest RCM nach BAW (2012)
- $t_0$ : Referenzzeitpunkt; Zeitpunkt des Beginns des RCM-Versuchs an Prüfkörpern, Betonalter ( $t_0 = 28$  d)
- $\alpha_{RCM}$ : Altersexponent [-], ermittelt nach dem Ansatz B
- $D_{app,B}(t)$ : scheinbarer Chloriddiffusionskoeffizient [ $m^2/s$ ] nach dem Ansatz B
- $k_e$ : siehe Ansatz A, Gleichung (7)

Der Schnellchloridmigrationstest RCM (Rapid Chloride Migration) wurde von Tang (1996) entwickelt und in mehreren europäischen Regelwerken eingeführt (z. B. NT Build 492, 1999, sowie BAW, (2012)). Im RCM-Prüfverfahren wird das Eindringen der Chloride in Beton mit Hilfe eines elektrischen Feldes beschleunigt. Nach Ende der Spannungsbeaufschlagung und nach Spalten der Probekörper wird mittels Indikatorlösungen die Eindringtiefe der Front der freien Chloridionen ermittelt. Aus der Eindringtiefe, der Höhe der angelegten Spannung und weiteren Parametern wird der Chloridmigrationskoeffizient berechnet. Die Prüfungsdauer variiert zwischen wenigen Stunden und einer Woche und ist im Vergleich zum Laborkurzzeitversuch Diffusionstest wesentlich kürzer. Das Prüfverfahren weist im Vergleich zum Diffusionsversuch zudem einen wesentlich geringeren Aufwand auf.

Nachdem für den Parameter Altersexponent eine maßgebliche Abhängigkeit von der Bindemittelart festgestellt wurde, wurde in Gehlen (2000) der Alters-exponent von Betonen mit den Hauptbindemittelarten Portlandzement (CEM I), Portlandflugaschzement (CEM I + FA ( $f \geq 0,20 \cdot z$ )) und Hochofenzement (CEM III/B) wie nachfolgend beschrieben quantifiziert.

Für jede der obengenannten Betonsorten wurden zunächst zahlreiche Chloridprofile aus verschiedenen Betonbauteilen mit entsprechender Bindemittelart zu unterschiedlichen Zeitpunkten zusammengestellt (Literaturangaben sowie eigene Bauwerksuntersuchungen in Gehlen, 2000). Die Bauteile wurden aus den Expositionsbereichen Unterwasser, Wasserwechselzone und Spritzwasser (XS2, XS3) gewählt. Die Betone wiesen Wasserzementwerte zwischen 0,40 und 0,60 auf. Die aus den Chloridprofilen mittels Regression nach dem Fick'schen Diffusionsgesetz (Gleichung (4)) ermittelten scheinbaren Chloriddiffusionskoeffizienten  $D_{app}(t)$  wurden in einem doppel-logarithmischen Diagramm dem Betonalter gegenübergestellt (Bild 6). Laborbetone mit ähnlichen Zusammensetzungen, d. h., gleiche Bindemittelart und  $0,40 \leq w/z \leq 0,60$ , wurden hergestellt und im Alter von 28 Tagen der RCM-Prüfung unterzogen. An den Bauwerksdaten wurde eine Regressionsanalyse durchgeführt und die resultierte Regressionslinie wurde durch den Mittelwert von  $D_{RCM}(t_0 = 28 \text{ d})$  gezwungen. Die so ermittelte Regressionslinie gibt den Altersexponenten nach dem Ansatz B wieder. Eine Quantifizierung des Altersexponenten nach diesem Ansatz in Abhängigkeit der Bindemittelart ist in Tabelle 3 dargestellt.

Durch das Zwingen der ursprünglich aus den Bauwerksdaten ermittelten Regressionslinie durch  $D_{RCM}(t_0)$  wurde die Steigung der Regressionslinie in allen drei Fällen, jedoch unterschiedlich groß, geringer (Bild 6), da der  $D_{RCM}(t_0)$  in allen Fällen einen geringeren Wert als der durch die Regression der Bauwerksdaten ermittelte Chloriddiffusionskoeffizient zum Zeitpunkt  $t_0$  aufweist. Dies bedeutet, dass der Altersexponent durch die Berücksichtigung des  $D_{RCM}(t_0)$  abnimmt, d. h. ungünstiger wird. Erkennbar ist auch, dass sich die Regressionslinien in allen drei Fällen zu einem Zeitpunkt zwischen 5 und 10 Jahren treffen. Nach dem Zusammentreffen der Regressionslinien liefert die durch  $D_{RCM}(t_0)$  gezwungene Linie größere (ungünstigere) Werte für  $D_{app}(t)$  als die Regressionslinie der Bauwerksdaten, was dadurch mit Blick auf Dauerhaftigkeitsbemessung zu vergleichend

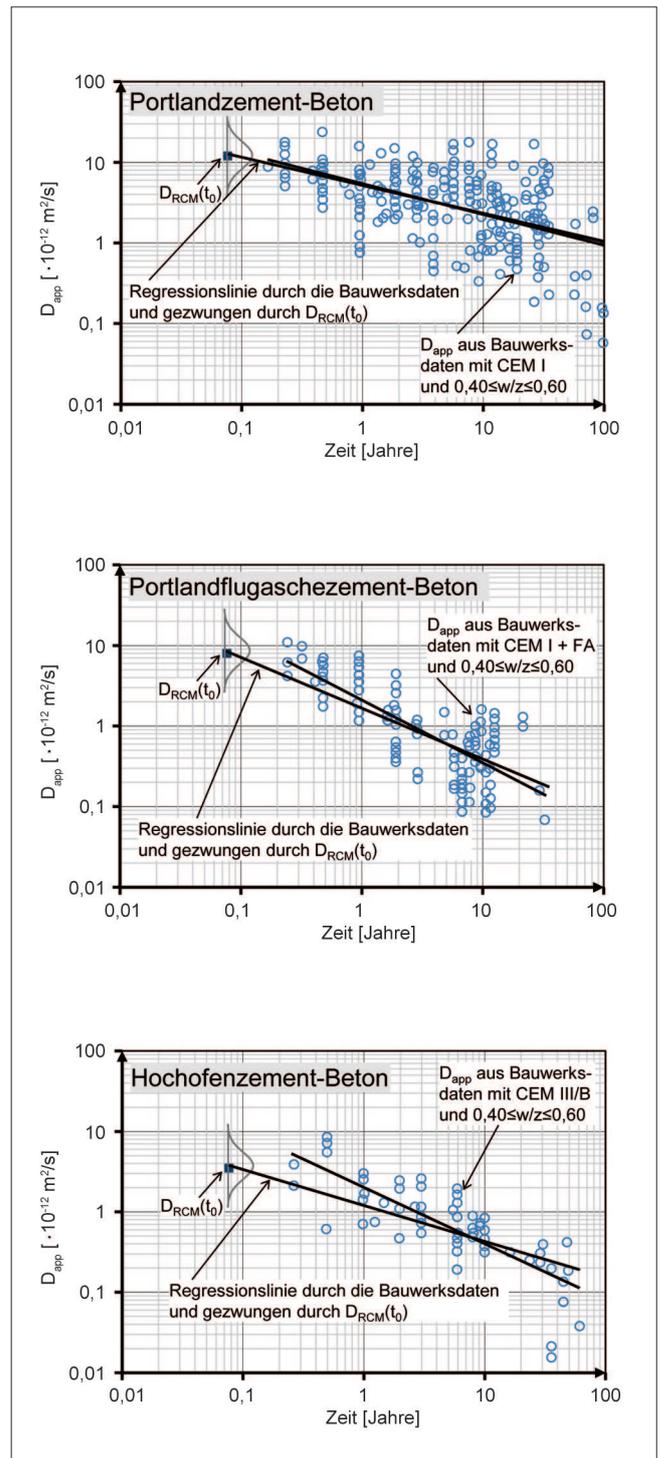


Bild 6: Entwicklung des scheinbaren Chloriddiffusionskoeffizienten über die Zeit für Betone aus Portlandzement (oben), Portlandflugaschzement (mitte) und Hochofenzement (unten), aus Gehlen (2000), modifizierte Darstellung

Figure 6: Development of the apparent chloride diffusion coefficient over time for concretes made of Portland cement (top), Portland-fly ash cement (middle) and GGBS cement (bottom), modified from Gehlen (2000)

Zementart nach DIN EN 197-1 (2014)		Altersexponent $\alpha_{RCM} [-]$
CEM I		0,30 <sup>3)</sup>
CEM II	CEM II/A-S	0,35 <sup>4)</sup>
	CEM II/B-S	0,37 <sup>4)</sup>
	CEM II/A-D	0,40 <sup>4)</sup>
	CEM II/A-P	0,40 <sup>4)</sup>
	CEM II/B-P	0,40 <sup>4)</sup>
	CEM II/A-Q	0,40 <sup>4)</sup>
	CEM II/B-Q	0,40 <sup>4)</sup>
	CEM II/A-V 1)	0,60 <sup>3)</sup>
	CEM II/B-V	0,60 <sup>4)</sup>
	CEM II/A-W	–
	CEM II/B-W	–
	CEM II/A-T	0,40 <sup>4)</sup>
	CEM II/B-T	0,40 <sup>4)</sup>
	CEM II/A-L	0,30 <sup>4)</sup>
	CEM II/B-L	–
	CEM II/A-LL	0,30 <sup>4)</sup>
	CEM II/B-LL	–
	CEM II/A-M	–
CEM II/B-M	–	
CEM III	CEM III/A	0,40 <sup>4)</sup>
	CEM III/B	0,45 <sup>3)</sup>
	CEM III/C	0,45 <sup>4)</sup>
CEM IV	CEM IV/A	–
	CEM IV/B	–
CEM V	CEM V/A	–
	CEM V/B	–
CEM III/A + ca. 10 % Flugasche <sup>2)</sup>		0,50 <sup>4)</sup>
<sup>1)</sup> Flugaschegehalt mindestens 18 M.-%/Gesamtmasse <sup>2)</sup> wirksame Bindemittelart; Zusammensetzung mit den Zementarten nach DIN EN 197-1 nicht abbildbar <sup>3)</sup> auf Basis von Untersuchungen, Gehlen (2000), abgeleiteter Wert <sup>4)</sup> auf Basis der Zementzusammensetzung angenommener Wert		

Tabelle 3: Altersexponent  $\alpha_{RCM}$  in Abhängigkeit der Zementart für Expositionsklassen XD2, XD3, XS2 und XS3

Table 3: Ageing exponent  $\alpha_{RCM}$  as a function of the cement type for exposure classes XD2, XD3, XS2 and XS3

sichereren bzw. konservativeren Ergebnissen führt (siehe auch Gehlen et al. (2015)). Die Differenz zwischen den beiden Regressionslinien ist im Fall der Hochofenzementbetone am größten. Für Portlandzementbetone liegen die Regressionslinien annähernd aufeinander.

Mit diesem Ansatz wird zum einen das Langzeitverhalten des Betons über mehrere Jahrzehnte mit Hilfe von bestehenden Bauwerken berücksichtigt. Zum anderen wird der potenzielle Widerstand des einzusetzenden Betons mit einem relativ geringen Aufwand gemessen und in Betracht gezogen.

Die in Gehlen (2000) statistisch quantifizierten Alters-exponenten für Betone mit den drei Hauptbindemittelarten CEM I, CEM I + FA und CEM III/B sind in Tabelle 3 dargestellt. Diese enthält ebenfalls auf dieser Basis angenommene Werte für Altersexponenten für einige weitere Zement- und Bindemittelarten. Die Annahmen basieren auf den für die drei o. g. Bindemittelarten ermittelten Werten und vorliegenden Erfahrungen und Erkenntnissen mit bzw. über die jeweilige Bindemittelart.

Für diesen Ansatz wurde durch seine Anwendung in zahlreichen vollprobabilistischen Dauerhaftigkeitsbemessungen in den letzten 15 Jahren eine breite Erfahrungsbasis geschaffen.

### Ansatz C: Ermittlung des Materialwiderstands $D_{app}(t)$ mittels Migrationsversuchs und Daten aus bestehenden Bauwerken

Dieser Ansatz zur Ermittlung des  $D_{app}(t)$  ist für den speziellen Bemessungsfall anzuwenden, wenn das Langzeitverhalten des einzusetzenden Produkts (Design-Produkt) durch Daten aus vereinzelt Bauwerken, die hinsichtlich Materialzusammensetzung sowie Expositionsbedingungen großenteils dem Bemessungsfall entsprechen, bestimmt ist.  $D_{app}(t)$  wird wie folgt berechnet:

$$D_{app,C}(t) = k_e \cdot D_{nss}(t_0) \cdot \left(\frac{t_0}{t}\right)^{\alpha_{app}} \quad (9)$$

Darin sind:

- $D_{ns}(t_0)$ : instationärer (non-steady state) Chloriddiffusionskoeffizient [ $m^2/s$ ] nach dem einseitigen Diffusionsversuch in Anlehnung an DIN EN 12390-11 (2015)
- $t_0$ : Referenzzeitpunkt; Dauer der Beaufschlagung des Prüfkörpers mit Chloridlösung im Diffusionsversuch ( $t_0 = 28$  d)
- $\alpha_{app}$ : Altersexponent [-], ermittelt nach dem Ansatz C
- $D_{app,C}(t)$ : scheinbarer Chloriddiffusionskoeffizient [ $m^2/s$ ] nach dem Ansatz C
- $k_e$ : siehe Ansatz A, Gleichung (7)

Der potenzielle Materialwiderstand ist in diesem Ansatz durch den Diffusionsversuch in Anlehnung an DIN EN 12390-11 (2015) durch eine 28-tägige Beaufschlagung des Prüfkörpers ( $t_0 = 28$  d) mit der Chloridlösung im Alter von 28 Tagen zu ermitteln (Analog zum Ansatz A). Der Altersexponent  $\alpha_{app}$  wird durch eine Regressionsanalyse der durch das Fitting der Chloridprofile aus den Bauwerken ermittelten Chloriddiffusionskoeffizienten berechnet (vgl. Bild 5). Um sicherzustellen, dass die ermittelten Chloriddiffusionskoeffizienten den realitätsnahen Widerstand des Betonbauteils gegen das Chlorideindringen in der exponierten Umgebung widerspiegeln, muss das erste einbezogene Chloridprofil mindestens 10 Jahre nach der Beaufschlagung des Bauteils erfolgen. Der zeitliche Abstand zu bzw. zwischen den weiteren Chloridprofilen muss mindestens 5 Jahre betragen.

### 3.4 Oberflächenchloridkonzentration $C_{S,0}$ bzw. $C_{S,\Delta x}$ (Einwirkung) *Surface chloride concentration $C_{s,0}$ and $C_{s,\Delta x}$ (action)*

Mit der Kenngröße Oberflächenchloridkonzentration bzw. Chloridkonzentration in der Tiefe  $\Delta x$  ( $C_{S,0}$  bzw.  $C_{S,\Delta x}$ ) wird die Einwirkung im Bemessungsmodell wiedergegeben (neben der Umgebungstemperatur).  $C_{S,\Delta x}$  ist sowohl material- als auch umweltabhängig und variiert mit der Zeit. Eine materialspezifische und zeitabhängige Berechnung dieses Parameters mit der Berücksichtigung weiterer Umwelt- und Konstruktionseinflüsse ist jedoch unter Praxisbedingungen nur schwer möglich. Die Oberflächenchloridkonzentration

ist für jeden Bemessungsfall auf Basis von Daten bestehender Bauwerke mit vergleichbaren Expositionsbedingungen abzuleiten. Erfahrungswerte (Mittelwerte) liegen für die Expositionsklassen XD2, XD3, XS2 und XS3 zwischen 2,0 bis 4,0 M.-%/b. In den Nomogrammen ist die Oberflächenchloridkonzentration von 1,0 bis 5,0 M.-%/b durch entsprechende Kurvenscharen berücksichtigt worden.

Durch die Berücksichtigung einer Konvektionszone  $\Delta x$  für Bauteile mit intermittierender Chloridbelastung (Expositionsklassen XD3 und XS3) werden die Randbedingungen (Einwirkung) für diese im Vergleich zu den restlichen Expositionen (XD2 und XS2) verschärft. Damit verschiebt sich die Oberflächenchloridkonzentration um den Betrag  $\Delta x$  in das Bauteilinnere, was eine Verkürzung der berechneten Zeit der Depassivierung der Betonstahloberfläche zur Folge hat. Im Anbetracht der günstigeren Randbedingungen für die Initiierung der Korrosion des depassivierten Betonstahls in Bauteilen unter intermittierender Feuchtebeanspruchung im Vergleich zu Unterwasserbauteilen (ggf. mangelnde Sauerstoffzufuhr) ist die durch die Konvektionszone vorgenommene Verschärfung der Einwirkung für XS3- und XD3-Bauteile im Einklang mit den angestrebten Zuverlässigkeiten bei der Dauerhaftigkeitsbemessung hinsichtlich chloridinduzierter Betonstahlkorrosion.

Die Konvektionszone  $\Delta x$  wird in der Bemessung mit 10 mm berücksichtigt. Die Nomogramme sind für die Expositionsklassen XS3 und XD3 erstellt worden. Sie können auch für die Bauteile der Expositionsklassen XS2 und XD2 verwendet werden, indem die Mindestbetondeckung als Ausgangsparameter (Ergebnis der Bemessung) um  $\Delta x = 10$  mm verringert und als Eingangsparameter (z. B. zur Ermittlung des erforderlichen  $D_{RCM}(t_0)$ ) um den Betrag von 10 mm erhöht wird.

### 3.5 Zielzuverlässigkeit *Target reliability*

Mit der Zielzuverlässigkeit wird die Anforderung an die Sicherheit des Bauwerks für den betrachteten Zustand ausgedrückt. Die Differenzierung der Zielzuverlässigkeit erfolgt mit dem Zielwert des Zuverlässigkeitsindex  $\beta_0$ . In der einschlägigen Normung und Literatur, insbesondere ISO 2394 (1998), DIN EN 1990 (2010), JCSS (2001), sind  $\beta_0$ -Werte als Empfehlung oder Anforderung

angegeben, die in erster Linie nach den Grenzzuständen der Tragfähigkeit oder der Gebrauchstauglichkeit eingeteilt sind.

Die ungewollten Bauteilzustände, die unter dem Dauerhaftigkeitsaspekt geregelt werden, u. a. Depassivierung des Betonstahls oder Beginn der Betonstahlkorrosion, sind dem Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit zugeordnet, welcher in der Regel unumkehrbare Folgen bedingt. DIN EN 1990 (2010) empfiehlt für den Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (mit mittleren irreversiblen Folgen) einen Zielwert des Zuverlässigkeitsindex von  $\beta_0 = 1,5$  (entspricht einer Eintretenswahrscheinlichkeit „probability of failure“ von  $p_f = 6,7\%$ ). Mit dem Hintergrund, dass die Einhaltung dieses Zielwerts bei den Expositionsklassen XD2, XD3, XS2 und XS3 zum Teil mit sehr großen Betondeckungen und hohen Kosten verbunden ist, (Gehlen et al. (2008), wird in DAfStb (2008) für diese Expositionsklassen, fallspezifisch, ein geringerer Zielwert von  $\beta_0 = 0,5$  ( $p_f = 30\%$ ) zugelassen, unter der Voraussetzung, dass eine Korrosion des Betonstahls durch regelmäßige Überwachung und Inspektion des Bauteils frühzeitig erkennbar wird und das Bauteil un-

ter den gegebenen Randbedingungen instandgesetzt werden kann. Angenommen wird hierbei, dass der Aufwand einer Instandsetzung in einem frühen Stadium der Betonstahlkorrosion gering gehalten wird.

### 3.6 Anwendungsbeispiele Examples

#### Beispiel 1:

Für den Unterwasserbereich (XS2) einer Kaimauer an der Nordseeküste (angenommen  $C_{S,0} = 4,0$  M.-%/b) mit einer festgelegten Mindestbetondeckung von 50 mm, einer Zielnutzungsdauer von  $t_{SL} = 70$  Jahren und einer Zielzuverlässigkeit von  $\beta_0 = 1,5$  soll ein CEM III/B-Beton verwendet werden. Mit der Wahl eines Altersexponenten  $\alpha_{RCM}$  von 0,45 (CEM III/B) aus Tabelle 3 und mit Hilfe des Nomogramms im Bild 7 (Nomogramm-Nr. N.4 aus Tabelle 1) ist für den Beton ein Chloridmigrationskoeffizient von  $D_{RCM}(t_0 = 28 d) \leq 2,65 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$  nachzuweisen. Der Eingangswert der Mindestbetondeckung ist hierbei für das XS2-exponierte Bauteil zu 60 mm zu wählen (siehe Tabelle 1, Fußnote 1, sowie Abschnitt 3.4).

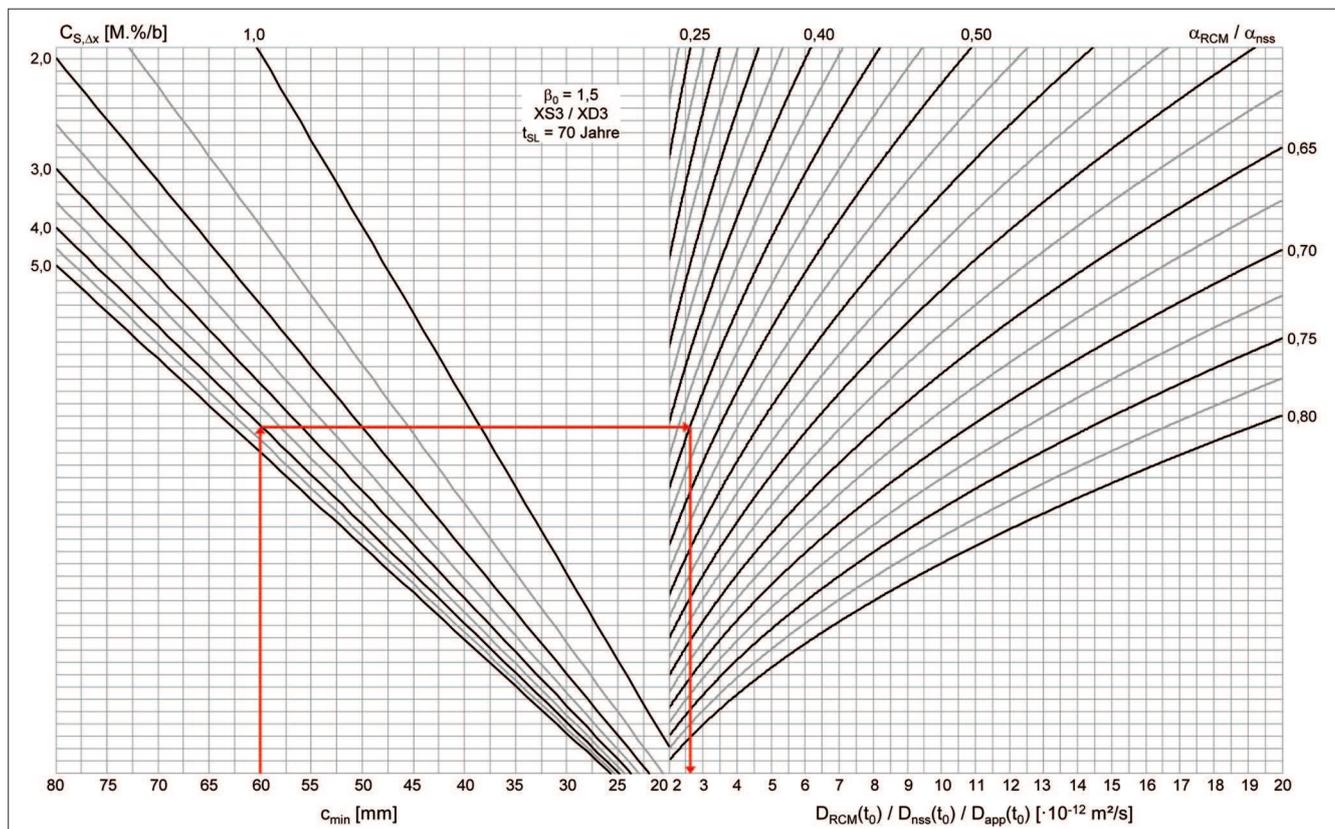


Bild 7: Bemessungsnomogramm für XS3 / XD3, Ziellebensdauer  $t_{SL} = 70$  Jahre, Zielzuverlässigkeit  $\beta_0 = 1,5, 2 \leq D(t_0) \leq 20$   
 Figure 7: Design nomogram for XS3 / XD3, target service life  $t_{SL} = 70$  years, target reliability index  $\beta_0 = 1.5, 2 \leq D(t_0) \leq 20$

t [d]	$D_{nss}(t) [\cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}]$
28	13,5
90	10,7
365	3,1
730	1,7

Tabelle 4: Ermittelte Chloriddiffusionskoeffizienten des Betons in verschiedenen Zeitpunkten aus den Laborversuchen in Anlehnung an DIN EN 12390-11 (2015)

Table 4: Calculated chloride diffusion coefficients of the concrete at different points in time by means of diffusion tests according to DIN EN 12390-11 (2015)

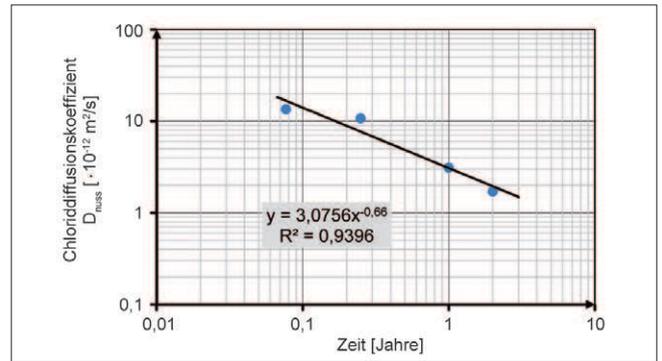


Bild 8: Ermittlung des Altersexponenten  $\alpha_{nss}$  aus den in Tabelle 4 dargestellten  $D_{nss}(t)$

Figure 8: Determination of the ageing exponent  $\alpha_{nss}$  from the  $D_{nss}(t)$  shown in Table 4

**Beispiel 2:**

Tabelle 4 zeigt die Ergebnisse der Diffusionsversuche in Anlehnung an DIN EN 12390-11 (2015) an einem Beton, welcher für den Bau eines XS3-exponierten Bauteils an der Ostseeküste angewendet werden soll. Das Bauteil soll für eine Zielnutzungsdauer von  $t_{SL} = 100$  Jahren (mit Zielzuverlässigkeit  $\beta_0 = 1,5$ ) bemessen werden. Die Einwirkung wird mit einer Ersatz-Oberflächenchloridkonzentration von  $C_{S,AX} = 3,0$  M.-%/b ange-

nommen. Die erforderliche Mindestbetondeckung wird mit den Eingangswerten  $D_{nss}(t_0 = 28 \text{ d}) = 13,5 \text{ m}^2/\text{s}$ , Tabelle 4,  $\alpha_{nss} = 0,66$ , Bild 8, und  $C_{S,AX} = 3,0$  M.-%/b und mit Hilfe des Nomogramms im Bild 9 (Nomogramm-Nr. N.2 aus Tabelle 1) mit  $c_{min} \sim 72 \text{ mm}$  berechnet. Mit einem Vorhaltemaß von  $\Delta c = 10 \text{ mm}$  nach ZTV-W LB 215 (2012) beträgt die erforderliche nominale Betondeckung  $c_{nom} \sim 82 \text{ mm}$ .

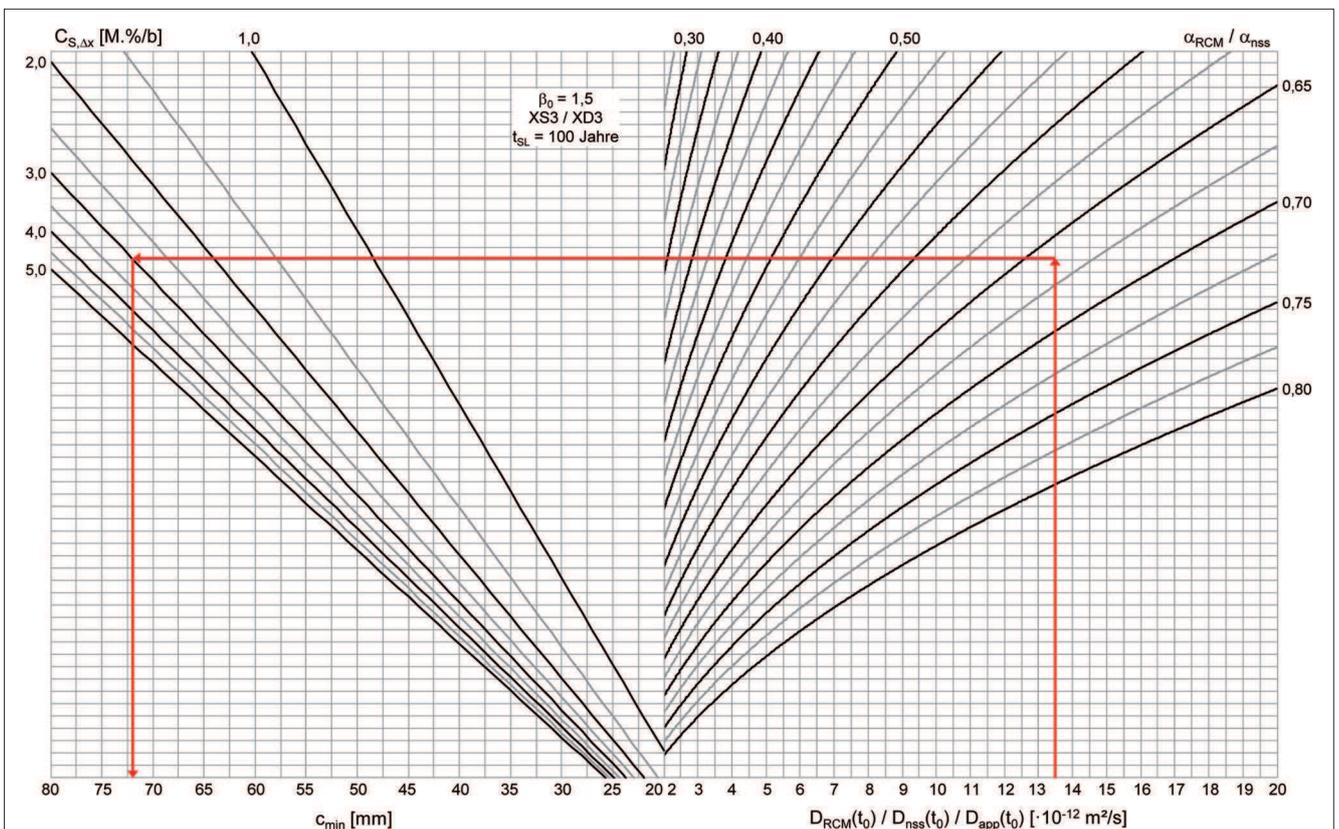


Bild 9: Bemessungsnomogramm für XS3 / XD3, Ziel Lebensdauer  $t_{SL} = 100$  Jahre, Zielzuverlässigkeit  $\beta_0 = 1,5$ ,  $2 \leq D(t_0) \leq 20$

Figure 9: Design nomogram for XS3 / XD3, target service life  $t_{SL} = 100$  years, target reliability index  $\beta_0 = 1,5$ ,  $2 \leq D(t_0) \leq 20$

## 4 Schlussbemerkungen *Conclusions*

Die entwickelten Bemessungsnomogramme ermöglichen im Hinblick auf den dauerhaftigkeitsrelevanten Aspekt „chloridinduzierte Betonstahlkorrosion“ eine transparente und leistungsbezogene Bemessung von Stahlbetonbauteilen. Bei der Anwendung der Nomogramme sind folgende Randbedingungen zu beachten:

- Für  $D_{RCM}(t_0)$  darf der größte Einzelwert 25 % des Mittelwerts nicht überschreiten,
- für  $D_{ns}(t_0)$  darf der Bestimmtheitsmaßgrad  $R^2$  95 % nicht unterschreiten,
- das Vorhaltemaß der Betondeckung  $\Delta c$  muss zwischen 5 und 15 mm betragen,
- die Eingangswerte basieren auf einer mittleren Jahrestemperatur des Bauteils von 10 °C,
- die Eingangswerte für die Diffusionskoeffizienten beziehen sich auf ein Proben- (zu Beginn der Prüfung) oder Bauteilalter von  $t_0 = 28$  Tagen,
- die Nomogramme sind für Betone mit einem Eigenchloridgehalt von max. 0,1 M.-%/b (Cl 0,10 nach DIN EN 206 (2014)) anwendbar.

Alle Eingangsvariablen sind als charakteristische Werte (d. h. Mittelwerte) anzugeben, nur  $c_{min}$  stellt den Bemessungswert der Betondeckung dar.

Neben der Bemessung von neu zu errichtenden Bauteilen bzw. Bauwerken können die Bemessungsnomogramme auch zu einer Bewertung der Restnutzungsdauer bestehender Bauwerke herangezogen werden, Rahimi (2016). In Rahimi (2016) wurde zudem ein Konzept zur Bemessung von Instandsetzungsmaßnahmen mittels Betonersatz entwickelt. Der erforderliche Chlorideindringwiderstand sowie die Schichtdicke des Instandsetzungsmaterials können in Abhängigkeit des verbleibenden Altbetons (Eigenschaften und Dicke) und der angestrebten Restnutzungsdauer mittels Nomogrammen berechnet werden.

Das vorgestellte Bemessungskonzept mittels Nomogrammen wird voraussichtlich in die zukünftige Instandhaltungsrichtlinie des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton zur Ermittlung der Restnutzungsdauer bestehender Bauwerke sowie zur Berechnung der Schichtdicke bei einer Instandsetzung mittels Betonersatz (bei vollständigem Ersatz der Betondeckung) aufgenommen.

## 5 Literatur *References*

BAW (2012): BAWMerkblatt Chlorideindringwiderstand von Beton (MCL). Bundesanstalt für Wasserbau.

Colleparidi, M.; Marcialis, A.; Turriziani, R. (1970): The kinetics of chloride ions penetration in concrete (in Italian). *Il Cemento*, No. 4 (1970) pp 157 – 164.

DAfStb (2008): Positionspapier des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton zur Umsetzung des Konzepts von leistungsbezogenen Entwurfsverfahren unter Berücksichtigung von DIN EN 206-1, Anhang J. In *Beton- und Stahlbetonbau* 103, 2008, Heft 12, S. 837 – 839.

DIN 1045-2 (2008): Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton – Teil 2: Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität – Anwendungsregeln zu DIN EN 206-1.

DIN EN 206-1 (2001): Beton – Teil 1: Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität. Deutsche Fassung EN 206-1:2000.

DIN EN 206 (2014): Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität; Deutsche Fassung EN 206:2013.

DIN EN 1990 (2010): Eurocode 0: Grundlagen der Tragwerksplanung; Deutsche Fassung EN 1990:2002 + A1:2005 + A1:2005/AC:2010.

DIN EN 1992-1-1 (2011): Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau; Deutsche Fassung EN 1992-1-1:2004 + AC:2010.

DIN EN 1992-1-1 (2011) + NA (2013): Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau.

DIN EN 12390-11 (2015): Prüfung von Festbeton – Teil 11: Bestimmung des Chloridwiderstandes von Beton – Einseitig gerichtete Diffusion.

- DuraCrete (1998): Probabilistic performance based durability design of concrete structures. EU-Project (Brite EuRam III). No BE95-1347.
- fib (2006): fib bulletin 34: Model Code for Service Life Design. Prepared by fib Task Group 5.6.
- fib (2015): fib bulletin 76: Benchmarking of Deemed-to-Satisfy Provisions in Standards – Durability of Reinforced Concrete Structures Exposed to Chlorides. Prepared by fib Task Group 8.6: Gehlen, C.; Greve-Dierfeld, S. v.; Gulikers, J.; Helland, S.; Rahimi, A. et al.
- fib (2010): fib Model Code for Concrete Structures.
- Gehlen, C. (2000): Probabilistische Lebensdauerbemessung von Stahlbetonbauwerken – Zuverlässigkeitsbetrachtungen zur wirksamen Vermeidung von Bewehrungskorrosion. Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton, Heft 510. Beuth, Berlin, Dissertation.
- Gehlen, C.; Schießl, P. und Schießl-Pecka, A. (2008): Hintergrundinformationen zum Positionspapier des DAfStb zur Umsetzung des Konzeptes von leistungsbezogenen Entwurfsverfahren unter Berücksichtigung von DIN EN 206-1, Anhang J, für dauerhaftigkeitsrelevante Problemstellungen. Beton- und Stahlbetonbau 103 (2008), Heft 12, S. 840 – 851.
- Gehlen, C.; Rahimi, A.; Reschke, T.; Westendarp, A. (2015): Bewertung der Leistungsfähigkeit von Instandsetzungsmaterialien und der Lebensdauer von instandgesetzten Stahlbetonbauteilen unter Chlorideinwirkung. Beton-Kalender 2015, Kapitel VI, Ernst & Sohn, Berlin.
- ISO 2394 (1998): General principles on reliability of structures.
- ISO 16204 (2012): Durability – Service life design of concrete structures.
- Leivestad, S. (2014): Durability – Exposure resistance classes, a new system to specify durability in EN 206 and EN 1992. Memo, JWG 250/104 – N25.
- NT Build 492 (1999): Concrete, Mortar and Cement-Based Repair Materials – Chloride Migration Coefficient from Non-Steady-State Migration Experiments.
- JCSS (2001): Probabilistic Model Code – Part 1: Basis of design. Prepared by Joint Committee on Structural Safety (JCSS). ISBN 978-3-909386-79-6.
- Rahimi, A. (2016): Semiprobabilistisches Nachweiskonzept zur Dauerhaftigkeitsbemessung und -bewertung von Stahlbetonbauteilen unter Chlorideinwirkung. Dissertation, Technische Universität München.
- Schneider, J. (2007): Sicherheit und Zuverlässigkeit im Bauwesen – Grundwissen für Ingenieure.
- STRUREL – A structural reliability analysis program system by RCP GmbH (Reliability Consulting Programs). [www.strurel.de](http://www.strurel.de).
- Tang, L. (1996): Chloride transport in concrete – measurement and prediction. Doctoral thesis, Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden.
- ZTV-W LB 215 (2012): Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen – Wasserbau (ZTV-W) für Wasserbauwerke aus Beton und Stahlbeton (Leistungsbereich 215), Ausgabe 2012. Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS).
- ZTV-ING (2014): Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten. Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS).