

9

Jahrgang

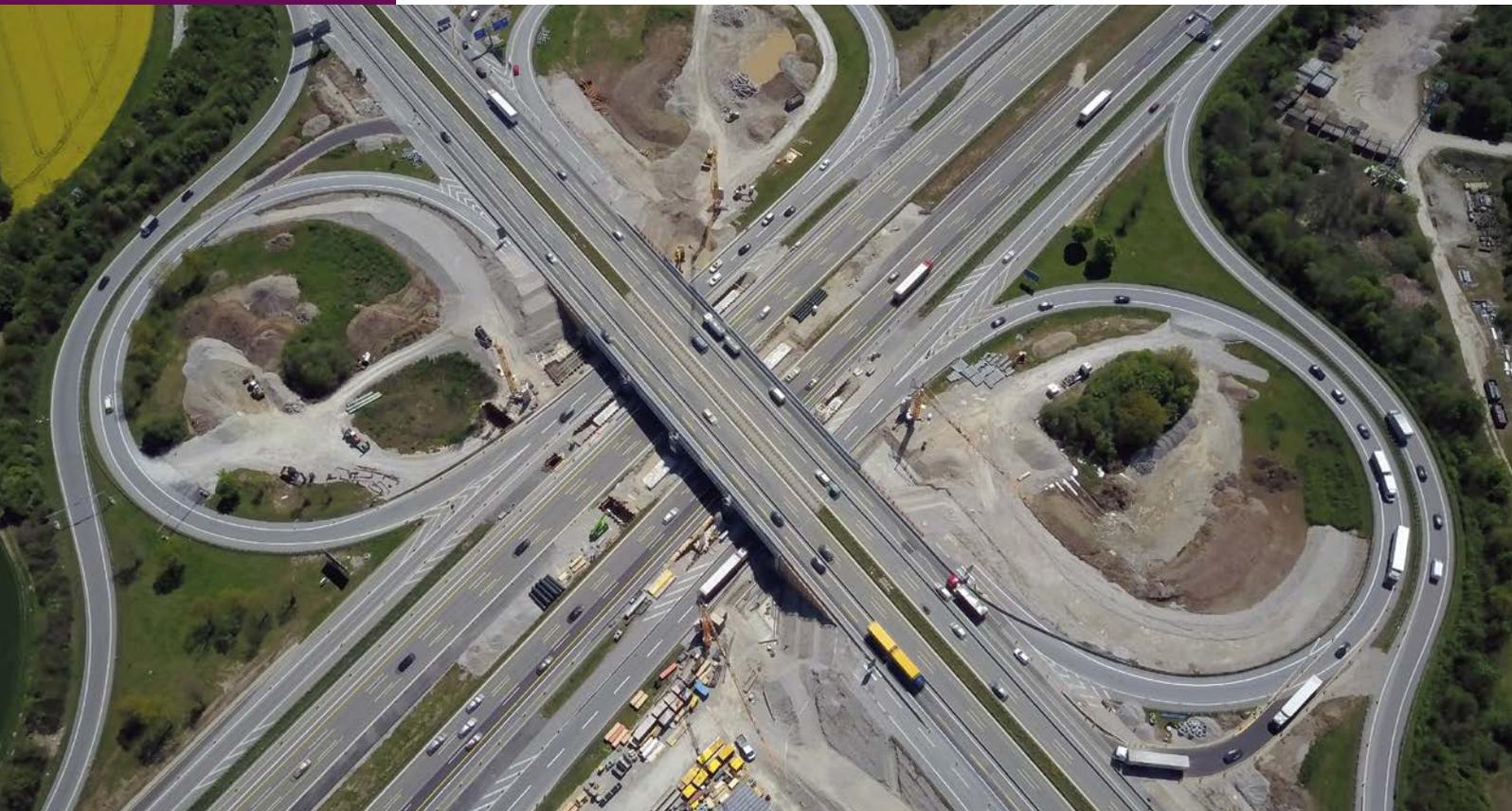
September 2017, S. 601-610

ISSN 0005-9900

À 1740

0
S nderdruck

Beton- und Stahlbetonbau



Nichtrostende Bewehrungsstähle zur Verlängerung der korrosionsfreien Lebensdauer von Stahlbetonbauwerken

Stefanie v. Greve-Dierfeld
Jan Bisschop
Yves Schiegg

Nichtrostende Bewehrungsstähle zur Verlängerung der korrosionsfreien Lebensdauer von Stahlbetonbauwerken

Derzeit wird bei stark chloridbelasteten Bauteilen die Dauerhaftigkeit im Allgemeinen durch dichte Betone, große Überdeckungen, konstruktive Maßnahmen und Beschichtungen sichergestellt. Die Dauerhaftigkeit durch den Einsatz nichtrostender Stähle zu gewährleisten, bleibt zumeist aus ökonomischen Gründen unberücksichtigt. Zukünftig kann der Einsatz niedrig legierter und damit weniger kostenintensiver Stähle eine Option zur Sicherstellung der Dauerhaftigkeit werden. Der vorliegende Bericht zeigt zum einen Untersuchungsergebnisse zum Korrosionsverhalten nichtrostender Stähle aus experimentellen Untersuchungen. Zum anderen zeigt diese Veröffentlichung in rechnerischen Analysen, welchen Vorteil die Verwendung eines nichtrostenden Stahls auf die korrosionsfreie Lebensdauer bzw. die erforderliche Bewehrungsüberdeckung gegenüber einem normalen Betonstahl bietet. In den Laboruntersuchungen an Mörtelproben wurde für niedriglegierten nichtrostenden Stahl der Stahlsorte 1.4003 der kritische, korrosionsauslösende Chloridgehalt C_{krit} gemessen und mit dem eines üblichen, warmgewalzten Betonstahls B500B verglichen. Die Ergebnisse zeigen eine Erhöhung des kritischen Chloridgehalts C_{krit} um den multiplikativen Faktor ca. 2 bis 3 gegenüber einem normalen Betonstahl. In Lösungsversuchen und Auslagerungsversuchen in Beton wurden ergänzend kritische Chloridgehalte an hochlegierten Duplexstählen der Werkstoffnummer 1.4462 bestimmt. Hierbei konnten um den Faktor > 5 erhöhte kritische Chloridgehalte festgestellt werden. In den rechnerischen Analysen wurde untersucht, welchen Einfluss ein ca. zwei- bis fünfmal so hoher kritischer Chloridgehalt auf die Nutzungsdauer und die erforderliche Bewehrungsüberdeckung haben kann. Die Berechnungen wurden deterministisch sowie probabilistisch durchgeführt. Die probabilistischen Berechnungen erfolgen für Zuverlässigkeitsniveaus von $b = 0,5$ bis $1,5$. Die rechnerische Analyse erfolgt auf Basis des *fib*-Modells. Der Einfluss wurde für drei bestehende Bauwerke der XD3-Exposition ermittelt. Dabei führt ein zwei- bis fünfmal so hoher kritischer Chloridgehalt, je nach gewähltem Zuverlässigkeitsniveau, zu einer 1,5- bis > 13 -mal höheren rechnerischen Lebensdauer.

1 Einleitung

Der Korrosionsschutz unlegierter Bewehrung beruht auf einer passivierenden Eisenoxidschicht, die sich im alkalischen Porenwasser (pH-Wert von mehr als 11 bis 11,5) spontan auf dem einbetonierten Stahl bildet. Eine Zerstörung dieser Passivschicht („Depassivierung“) kann unter baupraktischen Bedingungen nur durch die Karbonatisierung des umgebenden Betons, die mit einem Abfall des

On the effect of stainless steel on service life of reinforced concrete structures

At present, service life of reinforced concrete exposed to sea or deicing salts is generally enhanced by densifying concrete, increasing cover thickness, concrete coating or by constructive measures. Increasing the durability by the use of highly alloyed stainless steel instead of ordinary carbon steel is mostly not considered for economic reasons. However, the use of low-alloyed stainless steels, that are less costly, may be a realistic alternative option for ensuring durability.

This paper presents, firstly, experimental investigations on the corrosion behavior of stainless steels in mortar. Secondly, by means of model computations, the paper shows how stainless steel type (alloy grade) affect service life and required cover thickness compared to ordinary carbon steel.

In the laboratory tests on mortar samples, the critical, corrosion-inducing chloride content C_{crit} was measured for low-alloyed stainless steel of the steel grade 1.4003 and compared with that of a conventional, hot-rolled reinforcing steel B500B. The results show an increase in the critical chloride content C_{crit} by the multiplicative factor or about 2 to 3 compared to the ordinary reinforcement steel. In solution tests and exposure tests in concrete, additional critical chloride contents were determined on high-alloyed duplex steels of material number 1.4462. In these studies an increase of critical chloride content by a factor of 5 or larger were determined.

In the model computation the influence of critical chloride content in the range of experimental observations (2 to 5 times C_{crit} of carbon steel) on service life and required cover thickness were investigated. The calculations were carried out deterministically and probabilistically. The probabilistic calculations were performed for reliability levels of $\beta = 0,5$, $1,0$ or $1,5$. The computational analysis is based on the *fib* model. The influence was determined for three practical situations under XD3 exposure. The results show that an increase in the critical chloride content C_{crit} by the multiplicative factor about 2 to 5 compared to carbon steel leads to an increase in service life of 1.5 to > 13 in dependency of the selected reliability level.

pH-Werts im Beton auf Werte < 9 einhergeht, oder durch das Eindringen von Chloriden von der Bauteiloberfläche bis zur Bewehrung hervorgerufen werden.

Der kritische Chloridgehalt (C_{krit}) beschreibt den Chloridgehalt an der Bewehrung, bei dem lokale Korrosion (Lochfrass) initiiert wird. C_{krit} wird von der Betonfeuchte, dem pH-Wert des Porenwassers (Karbonatisierung, Auslaugung, w/b-Wert, Art und Menge von Zusatzstoffen),

dem Verhältnis von Chlorid- zu Hydroxidionenkonzentration $[Cl^-]/[OH^-]$, der Chloridbindekapazität des Zements (bei Angabe von C_{krit} als Gesamtgehalt), der Qualität der Stahloberfläche, der Qualität der Kontaktzone Stahl/Beton, der Bewehrungsüberdeckung (O_2 -Angebot), der Polarisation der Bewehrung/Makroelementbildung (Abmessung, Bewehrungsgehalt, Sauerstoffzutritt, Feuchteangebot), der Temperatur und dem Gehalt an korrosionsfördernden Stoffen beeinflusst [1–6]. In erster Linie ist C_{krit} bei nichtrostenden Stählen von der Art und dem Grad der Legierung abhängig.

Eine Methode, um die Nutzungsdauer von chloridbelasteten Stahlbetonbauteilen zu erhöhen, ist (legierte) nichtrostende Stahlsorten anstelle von unlegiertem Betonstahl für die erste Bewehrungslage zu verwenden. Nichtrostende Stähle werden durch ihre Werkstoffnummer (z.B. 1.4362) bezeichnet. Aus der Kurzbezeichnung (Beispiel: 1.4362/X2CrNiN 23-4) sind die wichtigsten Legierungselemente ersichtlich. Das Beispiel (Chrom-Nickel-Stahl) bezeichnet einen nichtrostenden Stahl (X) mit 0,02% Kohlenstoff C(X), 23% Chrom (Cr), 4% Nickel (Ni) und definiertem Gehalt an Stickstoff (N). Je nach Legierungszusammensetzung und -gehalt sowie Herstellungsart weisen nichtrostende Stähle ein ferritisches, martensitisches, austenitisches oder ein Mischgefüge (Duplex) auf. Das Gefüge beeinflusst die chemischen und mechanischen Eigenschaften des Stahls.

Im Falle nichtrostender Stähle ermöglicht Chrom (Cr) die Ausbildung einer passivierenden Chromschicht auch in weniger alkalischem Milieu bzw. deren Aufrechterhaltung auch bei erhöhter Chloridkonzentration. Der Korrosionswiderstand nichtrostender Stähle wird neben dem Chrom auch von den chemischen Elementen Molybdän (Mo) und Stickstoff (N) beeinflusst. Ein Maß für die Korrosionsbeständigkeit von nichtrostenden Stählen ist deren Wirksumme WS: $WS = Cr + 3.3 \cdot Mo + n \cdot N$.

2 Untersuchungen

2.1 Untersuchungen an „Lollipop-Proben“

In [7] wurde der kritische Chloridgehalt an niedrig legierten nichtrostenden Stählen und unlegiertem Betonstahl in Laboruntersuchungen ermittelt. Die Laboruntersuchungen fanden eingebettet in Mörtel statt (Lollipop-Proben). Die Methode zur Bestimmung von C_{krit} basierte auf weitgehend etablierten Prüfbedingungen (z.B. [8, 9]). Die wesentlichen Untersuchungsbedingungen und Untersuchungsparameter sind in Tab. 1 zusammengestellt. Die Ergebnisse der mikroskopischen Analysen der Stahl- bzw. Mörteloberfläche auf Anzeichen für Korrosion zum Zeitpunkt der Depassivierung sind in Bild 1 dargestellt. Die gemessenen C_{krit} -Werte der Referenzproben B500B und des Stahlsorte 1.4003 mit Walzhaut bzw. der heute üblichen gebeizten Oberfläche sind in Bild 2 dargestellt. Jeweils eine Probe mit Walzhaut und eine gebeizte Probe der CEM II-Serie zeigten eine frühe Potenzialabsenkung, aber keine Anzeichen für Korrosion, sodass diese Ergebnisse nicht herangezogen wurden.

Bei den CEM I-Proben lag der kritische Chloridgehalt im Mittel bei 1,25 M.-%/b (Variationskoeffizient CoV ~ 38%) für B500B, bei im Mittel 2,05 M.-%/b für Stahl der Sorte 1.4003 mit Walzhaut und bei im Mittel 4,9 M.-%/b (CoV = 9%) gebeizt. Bei den CEM II-Proben lag der kritische Chloridgehalt bei im Mittel 1,76 M.-%/b (CoV = 27%) für B500B, bei im Mittel 3,84 M.-%/b für Stahl der Sorte 1.4003 mit Walzhaut und bei im Mittel 5,97 M.-%/b (CoV = 16%) ohne Walzhaut. Das Beizen des Stahls führt zu einem im Mittel 1,5 bis 2,5-mal höheren C_{krit} .

Der entgegen der Erwartung höhere kritische Chloridgehalt der CEM II-Proben kann ggf. auf die längere Vorpassivierungsdauer der CEM II-Proben zurückgeführt werden [10–14]. Die Walzhaut führt zu geringeren C_{krit} Werten [11, 12].

Tab. 1 Untersuchungsbedingungen und Untersuchungsparameter
Experimental conditions and parameters

Stahlsorte	Top12 ¹ mit Walzhaut bzw. gebeizt; ca. 1.4003, ca. 11,5% Cr, WS = 11,5	Unlegierter Betonstahl B500B warmgewalzt WS = 0
Stahlgefüge	Martensitisch-ferritisch	
Stahldurchmesser	10 mm mit einer Länge von ca. 20 cm	
Zementart	CEM I 52,5R und CEM II/B-M(S-T) 42,5R	
w/b-Wert	0,60	
Sand	Gesiebter Standard CEN Sand (1 mm Größtkorn)	
Bewehrungsüberdeckung	10 mm	
Vorpassivierung	Calciumhydroxid-Lösung	
Vorpassivierungsdauer t_c	7, 22 und 98 Tage (CEM I) bzw. 212 Tage und 244 Tage (CEM II)	
Prüflösung	5M NaCl/l Calciumhydroxidlösung, monatl. Lösungswechsel, T ca. 20 °C	
Identifizierung der Korrosionsinitierung	Abfall des Korrosionspotenzials um ca. 100 bis 300 mV Mikroskopische Untersuchung der Stahloberfläche nach Entfernen des Mörtels auf Anzeichen für Korrosion	
Bestimmung des kritischen Chloridgehalts	Trocknung der Proben bei 50 °C, Bestimmung des Chloridgehalts der sich auf der Mörteloberfläche abzeichnenden Mörtelrippen (gemittelt über die eingebettete Stahloberfläche) mittels XRF; Angabe des Chloridgehalt in M.-%/b unter Berücksichtigung von Bindemittelgehalt und Probenmenge	

¹ Top12 – Nichtrostender Stahl der Firma Swiss Steel AG, Emmenweidstrasse 90, 6020 Emmen

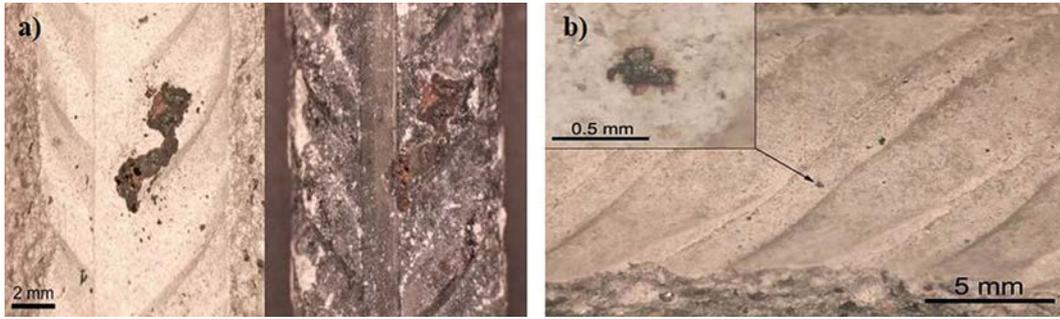


Bild 1 Anzeichen für Korrosion an Proben der Stahlsorte 1.4003. a) Top12 mit Walzhaut, b) Top12 gebeizt
Corrosion signs on test bars of Top12 (Steel 1.4003) with mill scale (a) or pickled surface (b)

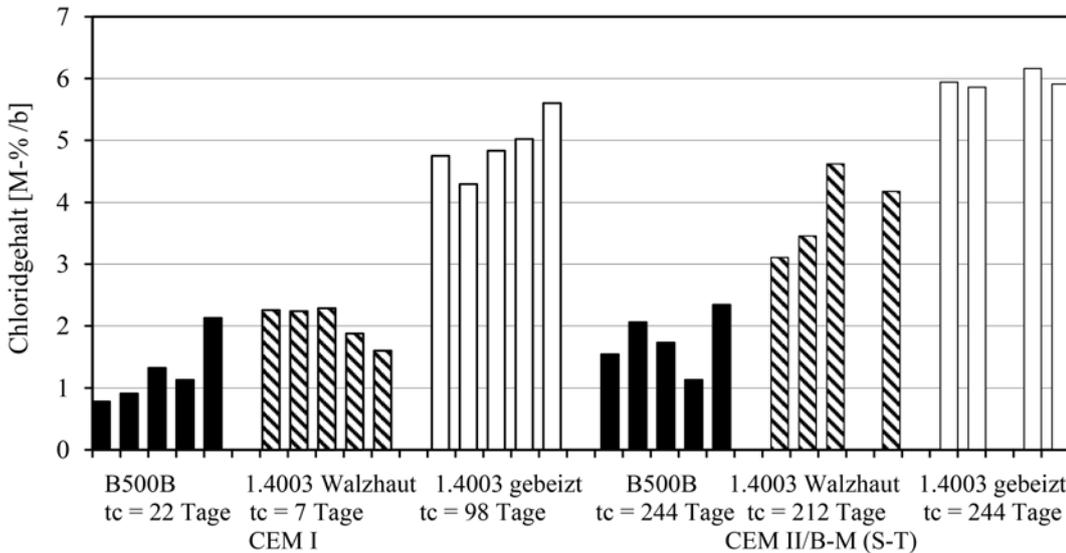


Bild 2 Einfluss der Stahlsorte auf den kritischen Chloridgehalt C_{krit} gemessen in Mörtelproben aus CEM I und CEM II/B-M (S-T) 42,5 R
Effect of alloy grade on the critical chloride content in mortar samples with CEM I or CEM II/B-M (S-T) 42.5 R

Bei den CEM I-Proben war der durchschnittliche C_{krit} -Wert des Stahls

- 1.4003 mit Walzhaut um einen multiplikativen Faktor 1,6 größer als der des B500B.
- 1.4003 gebeizt um einen multiplikativen Faktor 3,9 größer als der des B500B.

Bei den CEM II-Proben (alle mit der gleicher bzw. ähnlicher Passivierungszeit) war der durchschnittliche C_{krit} -Wert des Stahls

- 1.4003 mit Walzhaut um einen multiplikativen Faktor 2,2 größer als der des B500B.
- 1.4003 gebeizt um einen multiplikativen Faktor 3,4 größer als der des B500B.

2.2 Vergleich mit Lösungs-, Auslagerungsversuchen und Literaturergebnissen

Untersuchungen in Lösungen wurden in [1] durchgeführt. Untersucht wurden u. a. ein niedrig legierter Chromstahl (Top12, ca. 1.4003) und ein Duplexstahl. Beim Duplexstahl mit der Werkstoffnummer 1.4462 handelte es sich

um einen hoch legierten und generell sehr gut beständigen nichtrostenden Betonstahl mit ca. 21% Chrom, 4,5% Nickel, 2,5% Molybdän und 0,1% Stickstoff.

Messgröße war das Lochfraßpotenzial (Potenzial, bei dem Lochkorrosion initiiert wird). Dazu wurden Stromdichtepotenzialkurven in einer mobilen, elektrochemischen Zelle aufgenommen. Als Gegenelektrode diente ein Platindraht, als Referenzelektrode eine Silberchloridelektrode. Variiert wurden die Chloridkonzentration (3 m NaCl, 1 m NaCl, 0,1 m NaCl und 0,01 m NaCl) sowie der pH-Wert (pH 7, pH 11,5 und pH 13) des Mediums. Vor der Prüfung wurden die Probenoberflächen mit Ethanol im Ultraschallbad gereinigt und anschließend getrocknet. Pro Parameterkombination wurden jeweils drei Messungen durchgeführt.

Es war erkennbar, dass unlegierter Bewehrungsstahl bei pH 11,5 (teilkarbonatisierter Beton oder Beton mit geringerem Alkaliengehalt) ohne Chloride gerade noch passiv ist. Beim Top12-Stahl lag der Aktiv-/Passiv-Übergang zwischen einer Chloridkonzentration von 0,1 und 1 mol/l.

Die Stahlqualität 1.4462 zeigte ein passives Verhalten bis zu einer Chloridkonzentration von > 3 mol/l bei

einem pH-Wert von 7 (neutrale Lösung). Die aus der Chloridkonzentration der Lösung experimentell abgeleiteten kritischen Chloridgehalte lagen bei $0,12 \text{ M.-%/b} \leq C_{krit} \leq 1,0 \text{ M.-%/b}$ (B500B, pH 13), $1,2 \text{ M.-%/b} \leq C_{krit} \leq 2,0 \text{ M.-%/b}$ (pH 13) für Top12 und $C_{krit} > 3,0 \text{ M.-%/b}$ (pH 13 bis pH 7) für den hoch legierten Duplexstahl der Werkstoffnummer 1.4462.

Der durchschnittliche C_{krit} -Wert des Stahls war bei der Stahlsorte

- 1.4003 (Top12) mit Walzhaut um einen multiplikativen Faktor > 2 größer als der des B500B.
- 1.4462 (Duplexstahl) um einen multiplikativen Faktor > 5 größer als der des B500B.

Bei Lösungsversuchen ist zu bedenken, dass u. a. aufgrund der Homogenität des anstehenden Mediums, der idealen und weitgehend spaltfreien Messanordnung sowie der relativ kleinen Messfläche konstantere und höhere kritische Chloridgehalte erwartet werden, als an Mörtel- bzw. Betonproben [1, 15]. Aus den zuvor genannten Gründen werden an Bauwerken bzw. großformatigen Bauteilversuchen geringere kritische Chloridgehalte erwartet.

In [2] wurden kritische Chloridgehalte im Naxbergtunnel an ausgelagerten Proben unter natürlicher Chloridbeaufschlagung ermittelt. Die Langzeituntersuchungen zum kritischen Chloridgehalt wurden mit B500B, Top12 (mit Walzhaut) sowie Duplexstahl 1.4462 durchgeführt. Die Stähle waren in Betonprobenplatten aus verschiedenen Zementarten (CEM I, CEM II/A-D, CEM II/B-V, CEM II/A-S mit w/b-Werten von in der Regel 0,5) und in verschiedenen Tiefenlagen (10–45 mm) eingebettet. Der Beton auf Höhe der Stähle war teilweise karbonatisiert. Es wurde der Gesamtchloridgehalt aus Bohrkern- und Bohrmehlproben ermittelt, die nach der Korrosionsinitiierung entnommen worden waren, vgl. [2]. Die kritischen Chloridgehalte lagen zwischen 0,4 bis 0,9 M.-%/b bei B500B und 0,9 bis 1,4 M.-%/b bei Top12. Beim Duplexstahl trat keine Korrosion auf ($C_{krit} > 3 \text{ M.-%/b}$).

Der durchschnittliche C_{krit} -Wert war bei der Stahlsorte:

- 1.4003 (Top12) mit Walzhaut um einem multiplikativen Faktor von ≥ 2 größer als der des B500B.
- 1.4462 (Duplexstahl) um einem multiplikativen Faktor von > 4 größer als der des B500B.

Einen guten Überblick über den kritischen Chloridgehalt von Betonstahl vorwiegend ermittelt in Laboruntersuchungen liefert beispielsweise [3]. Die dort ermittelten kritischen Chloridgehalte liegen im Bereich der hier ermittelten Werte. An Bauwerken wurden in [16] Werte zwischen ca. 0,2 und 1,6 M.-%/b ermittelt.

Eine Abschätzung kritischer Chloridgehalte von höher legierten Stählen untersucht in (Poren-)Lösung unterschiedlicher pH Werte findet sich z. B. in [17–20]. Auch die hier angegebenen kritischen Chloridgehalte liegen im

Bereich der ermittelten Werte und waren bei pH 9 (karbonatisierter Beton pH ca. $< 9 - 8,5$) tendenziell geringer als bei pH 12,6. Eine Abschätzung von kritischen Chloridgehalten bei nichtrostenden Stählen in ungerissenem Mörtel und Beton findet sich beispielsweise in [21–23]. Für Stähle der Werkstoffnummer 1.4003 werden C_{krit} von im Mittel 1 M.-%/b [21] bzw. $0,6 < C_{krit} \leq 1,9 \text{ M.-%/b}$ [22], 1.4301 mit im Mittel 2 M.-%/b [21] bzw. bei 1.4462 mit $> 3 \text{ M.-%/b}$ [22, 23] bzw. 5 M.-%/b [24] genannt. Auch die hier angegebenen kritischen Chloridgehalte liegen im Bereich der ermittelten Gehalte. Einschränkungen werden in [25, 26] für nichtrostende Bewehrung im Rissbereich gemacht.

3 Einfluss des kritischen Chloridgehalts auf die Lebensdauer und die Bewehrungsüberdeckung

3.1 Bemessungsgleichungen

Um den Einfluss der Erhöhung des kritischen Chloridgehalts auf die Lebensdauer bzw. die Bewehrungsüberdeckung zu ermitteln, wurden rechnerische Analysen (Lebensdauerprognosen) durchgeführt. Diese erfolgten mit dem Modell nach [27] mit Gl. (1) und Gl. (2) und im Falle der probabilistischen Bemessung zudem nach Gl. (3).

Mit dem Modell Gl. (1) und Gl. (2) wird der Zeitpunkt berechnet, an dem der kritische Chloridgehalt die Bewehrung erreicht. Das Modell basiert auf der Fehlerfunktionslösung zum zweiten Fick'schen Diffusionsgesetz und geht von einer konstanten Chloridoberflächenkonzentration aus. Abweichungen vom Diffusionsverhalten im oberflächennahen Bereich werden darin durch Berechnung des zeit- und ortsabhängigen Chloridgehalts ab der Ersatztiefe Δx berücksichtigt.

$$C(x, t) = C_{krit} = C_0 + (C_{s, \Delta x} - C_0) \cdot \operatorname{erfc} \left(\frac{c - \Delta x}{2 \cdot \sqrt{D_{app}(t)} \cdot t} \right) \quad \text{Gl. (1a)}$$

$$x_{krit} = c = \Delta x + 2 \cdot \sqrt{D_{app}(t)} \cdot \sqrt{t} \cdot \operatorname{erfc}^{-1} \left(\frac{C_{krit} - C_0}{C_{s, \Delta x} - C_0} \right) \quad \text{Gl. (1b)}$$

$C(x, t)$	Chloridgehalt in der Tiefe x zum Zeitpunkt t , mit x gleichgesetzt mit der Bewehrungsüberdeckung	
$c = c_{nom}$		[m]
x_{krit}	Tiefe mit kritischem Chloridgehalt	[m]
c	Bewehrungsüberdeckung $c = c_{nom}$	[m]
Δx	Tiefenbereich mit Abweichung vom Fick'schen Verhalten	[m]
$D_{app}(t)$	Scheinbarer Chloriddiffusionskoeffizient des Betons	[m ² /s]
t	Betonalter	[s]
erfc^{-1}	Inverse der komplementären Fehlerfunktion	[-]
C_{krit}	Kritischer Chloridgehalt	[M.-%/b]
C_0	Eigenchloridgehalt des Betons (hier zu $C_0 = 0$ gesetzt)	[M.-%/b]

C_s Chloridkonzentration an der Bauteiloberfläche ($\Delta x = 0$) bzw. in der Tiefe Δx [M.-%/b]

$$D_{app}(t) = k_e \cdot D_{app}(t_{insp}) \cdot \left(\frac{t_{insp}}{t}\right)^\alpha \quad \text{Gl. (2)}$$

$D_{app}(t_{insp})$ scheinbarer Diffusionskoeffizient zum Zeitpunkt t_{insp} [m²/s]

α Altersexponent [-]

k_e Einfluss abweichender Temperatur für $D_{app}(t)$ (hier Mittelwert $k_e = 1,0$) [-]

Mit Gl. (3) wird die Wahrscheinlichkeit berechnet, mit der an der Bewehrung zu einem bestimmten Zeitpunkt der kritische Chloridgehalt vorliegt.

$$p\{c - x(C_{krit}, t) < 0\} \leq p_f = \Phi(-\beta) \quad \text{Gl. (3)}$$

p_f Versagenswahrscheinlichkeit [-]

β Zuverlässigkeitsindex [-]

Die vollprobabilistischen Analysen finden mit dem Programmpaket Struel statt. Zur Lösung des Optimierungsproblems wurde das Näherungsverfahren SORM verwendet. Hintergrundinformationen zu Lösungserfahren (Näherungsverfahren, Simulation) finden sich in [28]. In den vollprobabilistischen Berechnungen werden die Modellparameter als Zufallsvariablen, mit Verteilungsfunktion und Verteilungsparameter beschrieben. Für die deterministischen Berechnungen werden für die Modellparameter charakteristische Werte (hier: Mittelwerte) eingesetzt.

3.2 Modellparameter

Die Berechnung zum Einfluss des kritischen Chloridgehalts auf die Nutzungsdauer und die Bewehrungsüberdeckung erfolgte auf Basis von drei realen Bauwerkssituationen (Bauwerkssituation I, II und III) in der XD3-Exposition. Eine Zusammenfassung der davon abgeleiteten Modellparameter findet sich in Tab. 2. Die Bauwerkssituationen werden anschließend kurz beschrieben.

3.3 Bauwerkssituationen

Bauwerkssituation I:

Bei der Bauwerkssituation I handelt es sich um die Stahlbeton-Innenschale eines kurzen Tunnels (Baujahr 1982) auf der Nordumfahrung Zürich (Expositionsklasse XD3), die im Januar 2017 untersucht wurde. Der horizontale Abstand zur Straße betrug ca. 0,5 m. Für die Innenschale wurde vermutlich CEM I-Beton verwendet. Entlang der Fahrtrichtung Zürich wurde Bohrmehl verteilt über die gesamte Länge in einer Höhe über dem Bankett von 0,5 m bis 2,0 m in 10 mm Tiefenstufen entnommen. Der Chloridgehalt je Tiefenstufe und Entnahmestelle wurde mittels XRF bestimmt. Entgegen der Annahme war keine systematische Abnahme des Chloridgehalts mit der Höhe über Bankett oder dem Abstand zum Portal erkennbar. Mittels Regression von Gl. (1) an den empirischen Mittelwert der Chloridkonzentrationen je Tiefenstufe wurde die Chloridkonzentration $C_{s,\Delta x}$ in der Tiefe Δx und der scheinbare Diffusionskoeffizient zum Zeitpunkt der Inspektion berechnet. $C_{s,\Delta x}$ lag bei im Mittel 1,83 M.-%/b

Tab. 2 Modellparameter aus den Bauwerkssituationen I, II und III, Verteilungen (Verteilungsfunktion und Streuung) entnommen aus [27], bzw. gemäß Kapitel 3.3 und 3.4

Model parameters for situations I, II and III. Statistical distribution functions and parameters were taken from [27], or according to Chapter 3.3 and 3.4

Parameter	Einheit	Verteilungsfunktion	Mittelwert = charakteristische Werte			Standardabw. σ bzw. Variationskoeffizient CoV		
			I	II	III	I	II	III
$C_{s,\Delta x}$ ¹⁾	M.-%/b	Lognormal	1,81	3,10	4,05	75 % ¹⁾		
Δx ¹⁾	mm	Beta (a = 0, b = 50)	10			$\sigma = 5$		
C_0	M.-%/b	Konstante	0			-		
C_{krit}	M.-%/b	Lognormal	0,6 – 3,0			CoV = 25 %		
Gemessen $D_{app}(t_{insp})$	10 ⁻¹² m ² /s	Normal	0,50	1,14	0,87	CoV = 20 %		
t_{insp}	Jahre	Konstante	35	38	38	-		
α ²⁾	-	Beta (a = 0, b = 1)	0,30			$\sigma = 0,12$; CoV = 40 %		
t_{SL}	Jahre	Konstante	50			-		
$c = c_{nom}$ ³⁾	mm	Normal	55			$\sigma = 6$		
β	-	Deterministisch; 0,5; 1,0; 1,5						

¹⁾ Es werden auf der sicheren Seite liegend leicht erhöhte Variationskoeffizienten angesetzt. ²⁾ Die Anpassung des scheinbaren Diffusionskoeffizienten mit der Nutzungsdauer erfolgte mit Gl. (2) und dem in [27] angegebenen mittleren Altersexponenten $\alpha = 0,3$, da lediglich für spezifische CEM-I Betone Altersexponenten aus Diffusionsprüfungen bzw. Meerwasser exponierten Bauwerken mit ca. $0,2 < \alpha < 0,5$ vorliegen [z. B. 29, 30]. ³⁾ Der Einfluss des kritischen Chloridgehalts auf die Nutzungsdauer wurde für eine hypothetische, nach SIA 262 und DIN 1045-1:2008 konforme Bewehrungsüberdeckung von $c_{nom} = 55$ mm berechnet.

(CoV ca. 55 %). Der scheinbare Diffusionskoeffizient zum Zeitpunkt der Inspektion lag im Mittel bei $D_{app}(35 \text{ Jahren}) = 0,50 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$. Um C_{krit} abzuschätzen, wurde in Sondagen das vorab gemessene Korrosionspotenzial, der jeweilige Chloridgehalt auf Höhe der Bewehrung und der Korrosionsgrad verglichen. Bei Chloridgehalten von ca. 0,5 bis > 0,9 M.-%/b lagen Korrosionsgrade von 0 und 1 vor.

Bauwerkssituation II:

Die Bauwerkssituation II beschreibt das Widerlager eines Brückenbauwerks (horizontaler Abstand zur Straße ca. 1,5 m) im Kanton Schwyz aus dem Baujahr 1978 (Expositionsklasse XD3), das im Juni 2016 untersucht wurde. Für die Widerlager wurde CEM I-Beton verwendet (Baujahr 1978). An beiden Widerlagern wurden Bohrkerne verteilt über die gesamte Widerlagerbreite und in einer Höhe über Bankett von 0,5 m, 1,0 m und 1,5 m entnommen. Der Chloridgehalt wurde mittels XRF in 10 mm Tiefenstufen bis auf 75 mm Tiefe ermittelt. Mittels Regression von Gl. (1) an die empirischen Mittelwerte der Chloridkonzentration je Tiefenstufe wurde die Chloridkonzentration $C_{s,\Delta x}$ in der Tiefe Δx und der scheinbare Diffusionskoeffizient zum Zeitpunkt der Inspektion berechnet. Die Chloridkonzentration $C_{s,\Delta x}$ in der Tiefe Δx lag im Mittel bei $C_{s,\Delta x} = 3,1 \text{ M.-%/b}$ (CoV ca. 32 %). Der scheinbare Diffusionskoeffizient zum Zeitpunkt der Inspektion ergab sich zu $D_{app}(38 \text{ Jahre}) = 1,14 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$. Die Betonqualität entsprach vermutlich nicht heutigen Anforderungen.

Bauwerkssituation III:

Bei der Bauwerkssituation III handelt es sich um die Spindel bzw. Auffahrtsrampe eines Parkhauses (Baujahr 1976) im Kanton Zürich (Expositionsklasse XD3), die im Mai 2014 untersucht wurde. Für die Spindel wurde CEM I-Beton verwendet. Verteilt über die Fahrbahn der Spindel wurden Bohrkerne entnommen und in 15 mm Tiefenstufen mittels XRF der Chloridgehalt bestimmt. Die

Chloridkonzentration $C_{s,\Delta x}$ in der Tiefe Δx lag im Mittel aller Chloridprofile bei 4,05 M.-%/b (CoV ca. 62 %). Der mittels Regression ermittelte scheinbare Diffusionskoeffizient zum Zeitpunkt der Inspektion ergab sich zu $D_{app}(38 \text{ Jahren}) = 0,87 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$.

Die Temperatur lag an allen drei Bauwerken im langjährigen Mittel bei 10 °C und streute um ca. 8 °C.

3.4 C_{krit} für die rechnerischen Analysen

In Regelwerken angegebene (meist charakteristische) kritische Chloridgehalte finden sich in Tab. 3 und beziehen sich auf unlegierten Betonstahl. Im Schweizer Merkblatt SIA 2029 werden für nichtrostende Betonstähle zwar keine expliziten kritischen Chloridgehalte angegeben, die Bewehrungsüberdeckung wird gegenüber den Normen SN EN 1992-1-1 bzw. SIA 262 angepasst.

Für die rechnerischen Analysen wurde für Betonstahl B500B C_{krit} zu 0,6 M.-%/b als charakteristischer Wert (hier Mittelwert) gewählt.

In den deterministischen Analysen wurden die Mittelwerte variiert und entsprechend den Untersuchungsergebnissen in Kapitel 2 bis auf das 5-fache gegenüber B500B auf 1,0 M.-%/b, 1,5 M.-%/b, 2,0 M.-%/b, 2,5 M.-%/b und 3,0 M.-%/b erhöht.

Für die vollprobabilistischen Analysen wurden zur Beschreibung von C_{krit} die auf positive Werte beschränkte Lognormalverteilung aus den für das Maximalwertproblem „ C_{krit} “ in [15, 31] diskutierten Verteilungsfunktionen gewählt. Für Betonstahl wurde der Mittelwert mit $C_{krit,\mu} = 0,6 \text{ M.-%/b}$ und die Standardabweichung mit $C_{krit,\sigma} = 0,15 \text{ M.-%/b}$ bzw. Variationskoeffizient $\text{CoV} = 25 \%$ in Anlehnung an [27] gewählt. Auch in der vollprobabilistischen Analyse wurde $C_{krit,\mu}$ bis auf das 5-fache gegenüber

Tab. 3 Kritische Chloridgehalte aus Regelwerken (Betonstahl)
Critical chloride contents defined in technical specifications/standards.

Regelwerk/Spezifikation	Stahlsorte	C_{krit} [M.-%/b]	Bemerkung/Angaben
SIA 269-2:2011	Betonstahl	< 0,4	kaum Korrosionsrisiko
		$0,4 \leq C_{krit} \leq 1,0$	Korrosion möglich
		> 1,5	hohes Korrosionsrisiko
DAfStb Rili Sib 2001	Betonstahl	$\geq 0,5$	Maßnahmen sind einzuleiten
fib MC SLD 2006	Betonstahl	0,6	50 %-Quantil
Concrete Society TR61	Betonstahl	< 0,4	Korrosion vernachlässigbar
		0,4 – 1,0	Korrosion möglich
		1,0 – 2,0	Korrosion wahrscheinlich
		> 2,0	Sicher Korrosion
Angaben zum maximal zulässigen Chloridgehalt bei Betonherstellung			
DIN 1045-2/2013E	Betonstahl	0,4	Max. Chloridgehalt im Beton bei Herstellung
EN 206:2013	Betonstahl	0,2	Max. Chloridgehalt im Beton bei Herstellung
SN EN 206:2013	Betonstahl	0,1	Max. Chloridgehalt im Beton bei Herstellung

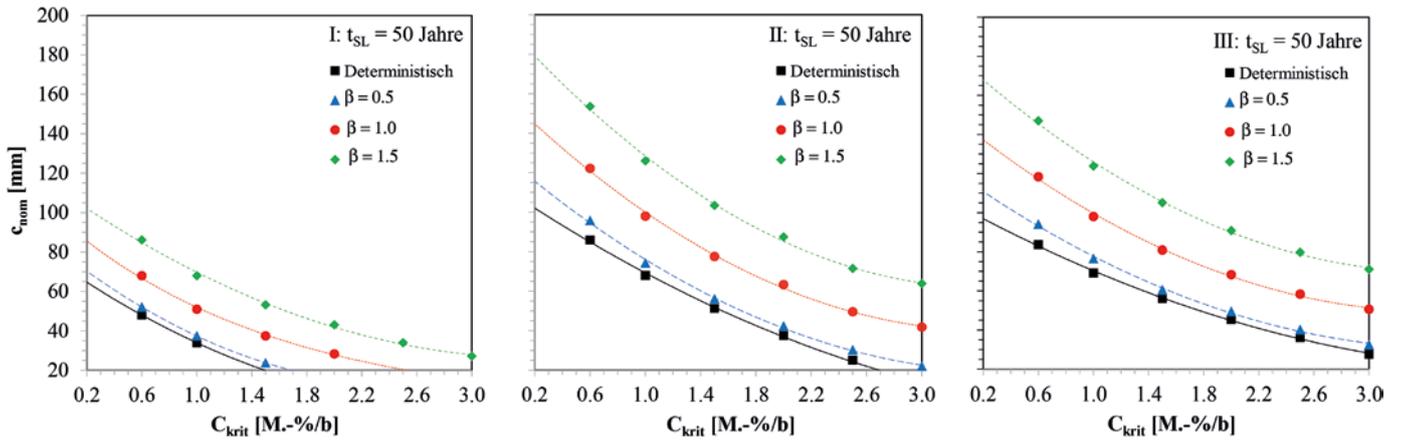


Bild 3 Bewehrungsüberdeckung in Abhängigkeit vom kritischen Chloridgehalt C_{krit} für die deterministische Berechnung (det) sowie für die probabilistische Berechnung mit Zielzuverlässigkeiten von 0,5; 1,0 und 1,5 für die Bauwerkssituationen I bis III
Concrete cover as a function of C_{krit} for the deterministic calculation as well as for the probabilistic calculation with target values $\beta = 0,5; 1,0$ and $1,5$ for the building situations I to III

B500B erhöht. Der Variationskoeffizient wurde dabei in Anlehnung an [15] konstant gehalten. Gegenüber [21] ergeben sich geringfügig höhere Streuungen bei nichtrostender Bewehrung.

3.5 Ergebnisse

In Bild 3 ist für die Bauwerkssituationen I bis III dargestellt, welche Bewehrungsüberdeckung rechnerisch erforderlich ist, wenn kritische Chloridgehalte zwischen 0,6 M.-%/b und 3,0 M.-%/b vorliegen (Symbole). Die Berechnungen erfolgten neben der deterministischen Berechnung für drei Zielzuverlässigkeiten ($\beta = 0,5, \beta = 1,0$ und $\beta = 1,5$). In Bild 3 nimmt die rechnerisch erforderliche Bewehrungsüberdeckung mit dem kritischen Chloridgehalt exponentiell ab.

Hätte man für die Brücke (II) Top12 gebeizt anstelle eines B500B (Bild 3, Mitte) gewählt, und erhöht sich C_{krit} auf 1,8 M.-%/b, wäre rechnerisch eine Bewehrungsüberdeckung von ca. 45 mm ausreichend gewesen, wenn Kor-

rosionsinitiierung mit 31 %-iger Wahrscheinlichkeit toleriert würde ($\beta = 0,5$, blaue Kurve). Hätte man für die Brücke (II) Duplexstahl anstelle eines B500B gewählt, und erhöht sich C_{krit} auf 3,0 M.-%/b, wäre rechnerisch eine Bewehrungsüberdeckung von ca. 20 mm ausreichend gewesen, wenn Korrosionsinitiierung mit 31 %-iger Wahrscheinlichkeit toleriert würde.

In Bild 4 ist die rechnerisch vorhandene Nutzungsdauer in Abhängigkeit vom kritischen Chloridgehalt dargestellt (Bauwerk I, II und III). Die Berechnungen erfolgten für eine Bewehrungsüberdeckung $c_{nom} = 55$ mm deterministisch sowie für drei Zielzuverlässigkeiten ($\beta = 0,5, \beta = 1,0$ und $\beta = 1,5$). In Bild 4 nimmt die rechnerisch vorhandene Nutzungsdauer mit dem kritischen Chloridgehalt exponentiell zu. Die Zunahme ist umso geringer, je höher die Zuverlässigkeit ist.

Hätte man für die Brücke (II) Top12 gebeizt anstelle eines B500B (Bild 4, Mitte) gewählt, und erhöht sich C_{krit} auf 1,8 M.-%/b, hätte die Nutzungsdauer rechnerisch ca. 70 Jahre betragen, wenn Korrosionsinitiierung mit

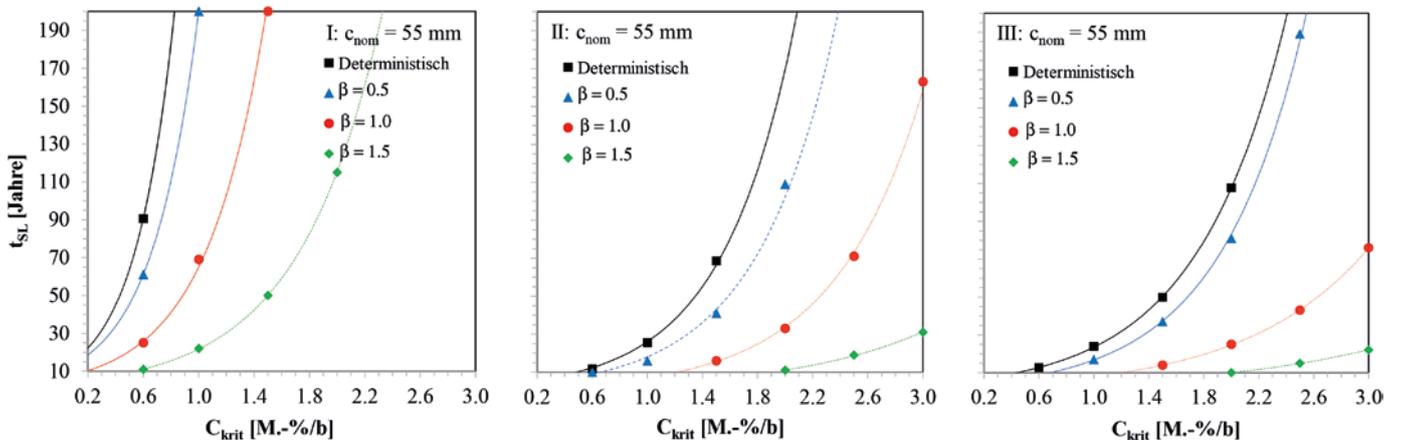


Bild 4 Nutzungsdauer in Abhängigkeit vom kritischen Chloridgehalt C_{krit} für die deterministische Berechnung (det) sowie für die probabilistische Berechnung mit Zielzuverlässigkeiten von $\beta = 0,5; 1,0$ und $1,5$ für die Bauwerkssituationen I bis III
Service life as a function of critical chloride content (C_{crit}) for the deterministic calculation and the probabilistic calculations with target reliabilities of $\beta = 0,5; 1,0$ and $1,5$ for the building situations I to III

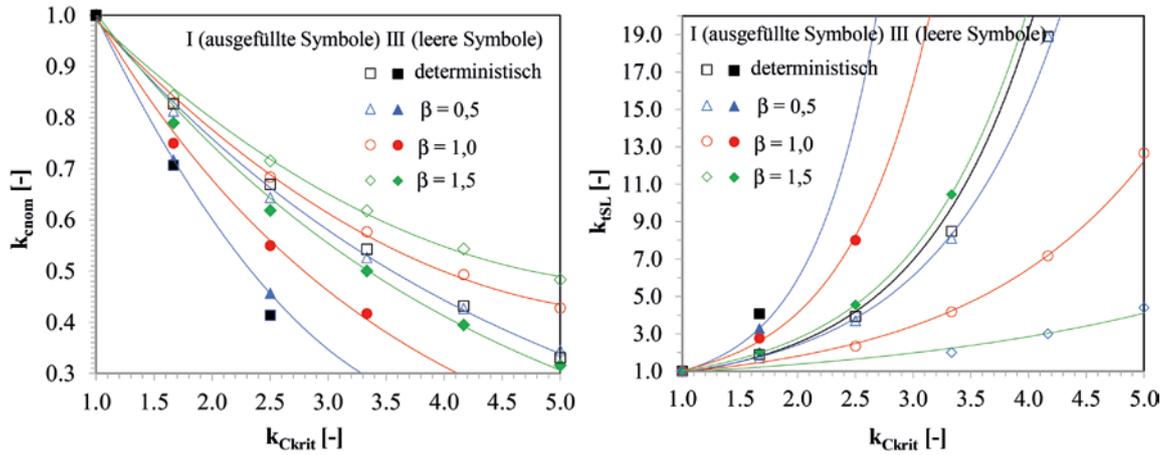


Bild 5 Einfluss von C_{krit} auf die Bewehrungsüberdeckung (links) und auf die Nutzungsdauer (rechts) für die Situationen I und III
Influence of C_{crit} on the concrete cover thickness (left) and on the service life (right) for situations I and III

31%-iger Wahrscheinlichkeit toleriert würde ($\beta = 0,5$, blaue Kurve).

Hätte man für die Brücke (II) Duplexstahl anstelle eines B500B gewählt, und erhöht sich C_{krit} auf 3,0 M.-%/b, hätte die Nutzungsdauer rechnerisch > 200 Jahre betragen, wenn Korrosionsinitiation mit 31%-iger Wahrscheinlichkeit toleriert würde.

3.6 Einflussfaktoren

In Bild 5 (links) ist dargestellt, um welchen multiplikativen Faktor (k_{cnom}) die Bewehrungsüberdeckung rechnerisch verringert werden kann, wenn sich C_{krit} um den Faktor k_{Ckrit} gegenüber normalem Betonstahl B500B erhöht. In Bild 5 (rechts) ist dargestellt, um welchen multiplikativen Faktor (k_{tSL}) sich die Nutzungsdauer rechnerisch verlängert, wenn sich C_{krit} um den Faktor k_{Ckrit} gegenüber normalem Betonstahl B500B mit einem C_{krit} von 0,6 M.-%/b erhöht. Der Einfluss des kritischen Chloridgehalts auf die Bewehrungsüberdeckung ist abhängig von der Chloridoberflächenkonzentration und dem Diffusionswiderstand des spez. Betons, vgl. Gl. (1). Der Einfluss von C_{krit} ist umso größer, je geringer C_s ist und je höher $D_{app}(t)$ ist.

Deshalb sind in Bild 5 Bereiche für k_{cnom} bzw. k_{tSL} angegeben (z. B. begrenzt durch die roten Kurven; untere Kur-

ven Situation I, obere Kurven Situation III). Zudem nimmt gemäß Bild 5 der Einfluss des kritischen Chloridgehalts mit zunehmender Zuverlässigkeit ab.

Wählt man in Bild 5 einen Stahl mit einem dreimal so hohen Widerstand gegen chloridinduzierte Korrosion ($k_{Ckrit} = 3$) wie der eines B500B, kann die Bewehrungsüberdeckung hier rechnerisch um den Faktor $k_{cnom} = 0,55$ verringert werden. Die Nutzungsdauer erhöht sich rechnerisch um den Faktor $k_{tSL} \geq 6$, wenn ein Zuverlässigkeitsniveau von $\beta = 0,5$ angestrebt würde.

In Tab. 4 ist zusammengefasst, um welchen multiplikativen Faktor sich gemäß der hier durchgeführten Untersuchungen und rechnerischen Analysen die Nutzungsdauer verlängern würde bzw. die Bewehrungsüberdeckung verringern würde, wenn anstelle eines B500B ein Top12 oder ein Duplexstahl verwendet würde.

4 Zusammenfassung und Ausblick

In Laboruntersuchungen (Lösungsversuchen und kleinformatigen Mörtelproben) und an Auslagerungsversuchen wurde festgestellt, dass sich der kritische Chloridgehalt bei Stahl der Werkstoffnummer 1.4003 (Top12) um einen multiplikativen Faktor von rund 2 (mit Walzhaut) bis > 3 (gebeizt) und bei Stahl der Werkstoffnummer 1.4462 (Duplexstahl) um einen multiplikativen Faktor

Tab. 4 Rechnerische Abminderung der Bewehrungsüberdeckung bzw. Erhöhung der Nutzungsdauer
Calculated factors for concrete cover thickness reduction (left) and service life increase (right)

Untersuchte Stähle der Stahlsorten	k_{Ckrit} [-]	k_{cnom} [-]			k_{tSL} [-]		
		$\beta = 0,5$ ($p_f = 31\%$)	$\beta = 1,0$ ($p_f = 16\%$)	$\beta = 1,5$ ($p_f = 7\%$)	$\beta = 0,5$ ($p_f = 31\%$)	$\beta = 1,0$ ($p_f = 16\%$)	$\beta = 1,5$ ($p_f = 7\%$)
Top12 mit Walzhaut	2	$\leq 0,74$	$\leq 0,78$	$\leq 0,80$	$\geq 2,5$	$\geq 1,5$	$\geq 1,5$
Top12 gebeizt	3	$\leq 0,55$	$\leq 0,61$	$\leq 0,64$	$\geq 6,0$	$\geq 3,0$	$\geq 2,0$
Duplexstahl	5	$\leq 0,35$	$\leq 0,42$	$\leq 0,48$	-	$\geq 13,0$	$\geq 5,0$

von rund >5 gegenüber normalem Betonstahl B500B erhöht. Die Untersuchungen an Top12-Stählen zeigten, dass der Erhöhungsfaktor von der Oberflächenbehandlung beeinflusst wird. Gegenüber den Stählen mit Walzhaut zeigte der gebeizte Stahl (heute üblich) verbesserte Korrosionseigenschaften gegenüber chloridinduzierter Korrosion in nicht karbonatisiertem Beton.

Gemäß den Untersuchungen und den rechnerischen Analysen kann die Bewehrungsüberdeckung hier um den Faktor:

- $k_{c_{nom}} \leq 0,74 \cdot c_{nom}$ ($\beta = 0,5$) bis $0,80 \cdot c_{nom}$ ($\beta = 1,5$) Top12 mit Walzhaut
- $k_{c_{nom}} \leq 0,55 \cdot c_{nom}$ ($\beta = 0,5$) bis $0,64 \cdot c_{nom}$ ($\beta = 1,5$) Top12 gebeizt
- $k_{c_{nom}} \leq 0,35 \cdot c_{nom}$ ($\beta = 0,5$) bis $0,48 \cdot c_{nom}$ ($\beta = 1,5$) für Duplexstahl

abgemindert werden, wenn dieser anstelle von normalem B500B verwendet würde.

Gemäß den Untersuchungen und den rechnerischen Analysen erhöht sich die Nutzungsdauer hier um den Faktor:

- $k_{t_{SL}} = 2,5$ ($\beta = 0,5$) bis $1,5$ ($\beta = 1,5$) für Top12 mit Walzhaut

- $k_{t_{SL}} = 6,0$ ($\beta = 0,5$) bis $2,0$ ($\beta = 1,5$) für Top12 gebeizt
- $k_{t_{SL}} = 13,0$ ($\beta = 1,0$) bis $5,0$ ($\beta = 1,5$) für Duplexstahl,

wenn dieser anstelle von normalem B500B verwendet würde.

Gerade für Bauwerke, bei denen kein ausreichend hoher Betonwiderstand gesichert werden kann (besonders geeignete Betonrohstoffe sind vor Ort nicht verfügbar), die Chloridbelastung hoch ist, oder lange Nutzungsdauern gewünscht sind, kann die Verwendung von nichtrostenden Stählen gegenüber der Variation „ein- bzw. mehrfache Instandsetzung“ wirtschaftlich vorteilhaft sein [32].

Die bisherigen Untersuchungen basieren ausschließlich auf Untersuchungsergebnissen zum kritischen Chloridgehalt in ungerissenem, nicht- oder teilkarbonatisiertem Beton und rechnerischen Analysen. Weitere Untersuchungen werden auch Auskunft über den Korrosionsfortschritt und weitere Korrosionskenngrößen geben.

Dank

Wir bedanken uns bei CHRISTIAN LINDEN, Swiss Steel AG, 6020 Emmenbrücke, Schweiz für den Anstoß und die finanzielle Unterstützung zu dieser Veröffentlichung.

Literatur

- [1] SCHIEGG, Y.; HUNKELER, F.; VOUTE, C-H.: *Korrosionsbeständigkeit von nichtrostenden Betonstählen*, Forschungsbericht zum Forschungsauftrag AGB 2005/010, 2012.
- [2] SCHIEGG, Y.; HUNKELER, F.; KELLER, D., UNGRICHT, H.: *Massnahmen zur Erhöhung der Dauerhaftigkeit – Fortsetzung des Feldversuchs Naxberg*, ASTRA Forschungsprojekt AGB 2005/01, 2017.
- [3] ANGST, U.; ELSENER, B.; LARSEN, C.K.; VENNESLAND, O.: *Critical chloride content in reinforced concrete – A review*. Cement and Concrete Research **39** (2009), 1122–1138.
- [4] HUNKELER, F.: *Einsatz nichtrostender Stähle im Betonbau*. VSS Bericht Nr. 543, Mai 2000.
- [5] FREDERIKSEN, J. M.: *Chloride threshold values for service life design*. Rilem Workshop TMC in Paris, September 2000.
- [6] BREIT, W.: *Critical corrosion inducing chloride content – State of the art and new investigation results*, Betontechnische Berichte 1998–2000, Verein Deutscher Zementwerke e.V. Verlag Bau+Technik, Düsseldorf, 2001, S. 145–167.
- [7] BISSCHOP, J.; SCHIEGG, Y.; LINDEN, C.: *Effect of rebar and cement type on the critical chloride content of reinforced concrete*. Proceedings of EUROCORR, Montpellier (F), Sept. 2016.
- [8] Swiss Standard SN EN 480-14:2006: Zusatzmittel für Beton, Mörtel und Einpressmörtel – Prüfverfahren – Teil 14: Bestimmung des Korrosionsverhaltens von Stahl in Beton – Elektrochemische Prüfung bei gleichbleibendem Potential.
- [9] NYGAARD, P. V.; GEIKER, M. R.: *A method for measuring the chloride threshold level required to initiate reinforcement corrosion in concrete*. Materials and Structures **38** (2005), pp. 489–494.
- [10] KAESCHE, H.: *Die Korrosion der Metalle*. Springer Heidelberg Dordrecht London New York, 2011, ISBN: 978-3-642-18427-7.
- [11] ANGST, U.; GEIKER, M.; MICHEL, A.; GEHLEN, CH.; WONG, H.; ISGOR, B.; ELSENER, B.; HANSSON, C.; FRANCOIS, R.; HORNBOSTEL, K.; POLDER, R.; ALONSO, M.; SANCHEZ, M.; CORREIA, M.; CRIADO, M.; SAGÜES, A.; BUENFELD, N.: *The steel-concrete interface*, Materials and Structures, Vol. 50 (2017); Issue 143, DOI 10.1617/s11527-017-1010-1.
- [12] Shi, J.; SUN, W.; JIANG, J.; ZHANG, Y.: *Influence of chloride concentration and pre-passivation on the pitting corrosion resistance of low-alloy reinforcing steel in simulated concrete pore solution*. Construction and Building Materials Vol 111 (2016), pp. 805–813.
- [13] SHI, J.; MING, J.: *Influence of mill scale and rust layer on the corrosion resistance of low-alloy steel in simulated concrete pore solution*, International Journal of Minerals Metallurgy and Materials, Vol.24 (2017), Issue 1, pp. 64–74.
- [14] LOLLINI, F.; REDAELLI, E.; BERTOLINI, L.: *Investigation on the effect of supplementary cementitious materials on the critical chloride threshold of steel in concrete*, Materials and Structures, vol. 49 (2016), 4147–4165.
- [15] ANGST, U.; RONNQUIST, A.; ELSENER, B.; LARSEN, C.; VENNESLAND, O.: *Probabilistic considerations on the effect of specimen size on the critical chloride content in reinforced concrete*. Corrosion Science **53** (2011), pp. 177–187.
- [16] ANGST, U.; ELSENER, B.; LEEMANN, A.; VAN NYGAARD, P.: *Methoden zur Bestimmung des kritischen Chloridgehalts an bestehenden Stahlbetonbauwerken*. ASTRA AGB 2012/010, 2016.

- [17] BERTOLINI, L.; BOLZONE, F.; PASTORE, T.; PEDEFERRI, P.: *Behaviour of stainless steel in simulated concrete pore solution*, British Corrosion Journal 31 (1996), 218–222.
- [18] BERTOLINI, L.; GATALDI, M.: *Corrosion resistance of austenitic and low-nickel duplex stainless steel bars*. Proceedings EuroCorr 2009, Nice.
- [19] HURLEY, M. F.; SCULLY, J. R.: *Threshold chloride concentrations of selected corrosion-resistant rebar materials compared to carbon steel*. Corrosion Science 62 (2006), pp. 892–904.
- [20] RANDSTRÖM, S.; ALMEN, M.; PETTERSON, R.; ADAIR, M. (2010): *Reproducibility of critical chloride threshold level for stainless steels reinforcement*. 2010, <http://www.outokumpu.com>, 17.2.2017.
- [21] BRÜHWILER, E.; DANIERI, E.; URLAU, U.; HASLER, S.; PETER, H.: *Betonstahl mit erhöhtem Korrosionswiderstand*. Beton- und Stahlbetonbau 97 (2002), Heft 5, S. 239–249.
- [22] COX, R. N.; CIGNA, R.; VENNESLAND, O.; VALENTE, T.: *Corrosion and protection of metals in contact with concrete*, European concerted action COST 509, Final Report, 1997.
- [23] SEDERHOLM, B.; ALMQVIST, J.; RANDSTRÖM, S.: *Corrosion properties of stainless steels as reinforcement in concrete in Swedish outdoor environment*. ACOM A corrosion management and applications engineering magazine from Outokumpu, Vol. 2 (2009), pp. 16–24.
- [24] CUNAT, P.-J.: *Corrosion resistant stainless steels in soils and concrete*. Paper presented at the plenary days of the committee on the study of pipe corrosion and protection, Biarritz, October 2001.
- [25] VAN NIEJENHUIS, C. B.; WALBRIDGE, S.; HANSSON, C. M.: *The performance of austenitic and duplex stainless steels in cracked concrete exposed to concentrated chloride brine*, Journal of Materials Science, Vol. 51 (2015), Issue 11, pp. 362–374.
- [26] ISLAM, M. A.; BERGSMA, B. P.; HANSSON, C. M.: *Chloride-induced corrosion behavior of stainless steel and carbon steel reinforcing bars in sound and cracked concrete*, Corrosion Engineering, Vol. 69 (2013), Issue 3, pp. 303–312.
- [27] *fib Bulletin 34* (2006): Model Code for service life design.
- [28] DITLEVSEN, O.; MADSEN, H.O.: *Structural reliability methods*, John Wiley & Sons Ltd, Chichester 2005, ISBN 0 471 96086 1.
- [29] SKOLSVOLD, O.: *Kloriddiffusjon i betong. Vurdering av aldringseffekten vedfelteksponeering*, COIN Project Report 11, 2009.
- [30] COSTA, A.; APPLETON, J.: *Chloride penetration into concrete in marine environment – Part I and Part II*, Materials and Structures, Vol. 32 (1999), pp. 252–359.
- [31] HARNISCH, J.; RAUPACH, M.: *Untersuchungen zum kritischen korrosionsauslösenden Chloridgehalt unter Berücksichtigung der Kontaktzone zwischen Stahl und Beton*. Beton- und Stahlbetonbau 106 (2011), Heft 5, S. 299–307.
- [32] GARTNER, N.; KOSEC, T.; LEGAT, A.; KRANJIC, A.: *Life cycle cost analysis (LCCA) of corrosion resistant steel based on long-term corrosion monitoring*. EuroCorr 2017, European Corrosion Congress, Montpellier, France.

Autoren



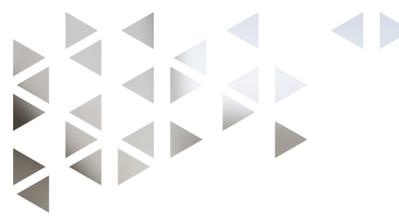
Dr.-Ing. Stefanie v. Greve-Dierfeld
TFB Technologie und Forschung im Betonbau
Lindenstrasse 10
5103 Wildegg, Schweiz



Dr. Jan Bisschop
TFB Technologie und Forschung im Betonbau
Lindenstrasse 10
5103 Wildegg, Schweiz



Dr. Yves Schiegg
TFB Technologie und Forschung im Betonbau
Lindenstrasse 10
5103 Wildegg, Schweiz



Weitsichtiges Denken zahlt sich aus.



Der kostengünstige nichtrostende Betonstahl Top12 bietet dank einem Chromanteil von über 12 Prozent einen zuverlässigen Schutz gegen Korrosion und macht Bauten siebenmal langlebiger. Instandsetzungen werden vermeidbar, die Lebenszykluskosten sinken markant.

www.swiss-steel.com

Member of Swiss Steel Group

