

# 10

113. Jahrgang  
Oktober 2018, 746-755  
ISSN 0005-9900  
A 1740

**Sonderdruck**

# Beton- und Stahlbetonbau



## 100 Jahre Dauerhaftigkeit für Brücken- und Tunnelbauwerke

**Das variable 3-Stufen-Konzept**

Angelika Schießl-Pecka  
Uwe Willberg  
Anne Rausch  
Wolfgang Bäuml

# 100 Jahre Dauerhaftigkeit für Brücken- und Tunnelbauwerke

## Das variable 3-Stufen-Konzept

An verschiedenen Verkehrsbauwerken (Tunnelbauwerke und Brücken) wurden nach nur relativ kurzer Nutzung (rd. 20 Jahre) sehr hohe Chloridgehalte in den chloridexponierten Bauteilen (Tunnelwände, Notgehwege, Brückenpfeiler, Widerlager und Brückenkappen) festgestellt. An manchen Bauteilen war die daraus resultierende Bewehrungskorrosion zum Teil schon so weit fortgeschritten, dass ein Austausch/Abbruch der entsprechenden Bauteile vorgenommen werden musste. Um zukünftig dauerhaftere Betonbauwerke planen und erstellen zu können, wurde das sogenannte 3-Stufen-Konzept entwickelt, bei dem insgesamt drei Lösungsansätze zur Erhöhung der Dauerhaftigkeit zur Verfügung stehen und den einzelnen Bauteilen in Abhängigkeit von der Beanspruchungsintensität zugewiesen werden können.

Zur Herleitung des 3-Stufen-Konzepts wurden zunächst verschiedene dauerhaftigkeitsrelevante Schäden an Verkehrsbauwerken analysiert, um die Bereiche zu identifizieren, die durch die normativen Dauerhaftigkeitsanforderungen noch nicht ausreichend geschützt werden. Parallel dazu wurden die dauerhaftigkeitsrelevanten Einflussfaktoren auf der Einwirkungsseite (Streusalzaufkommen, Verkehrsintensität, Entfernung der Chloridquelle vom Bauteil, Bauteilausrichtung) erarbeitet, sodass unter Kenntnis der Schäden und Einwirkungen eine sinnvolle Einteilung der Bauteile vorgenommen werden konnte. In Anlehnung an die Einflussfaktoren der Widerstandsseite (Betondeckung, Materialwiderstände von Beton und Stahl, Oberflächenschutzsystem) wurden dann drei Lösungsstrategien entwickelt, mit denen die Dauerhaftigkeit von chloridexponierten Betonbauteilen verbessert werden kann. Im Wesentlichen ist dies eine Verlangsamung des Chloridtransports durch betontechnologische Maßnahmen, eine Erhöhung des kritischen korrosionsauslösenden Chloridgehalts durch Verwenden von Bewehrungsstahl mit erhöhtem Korrosionswiderstand und das Unterbinden des Chlorideintrags in den Konstruktionsbeton durch Aufbringen einer Tiefenhydrophobierung. Im letzten Schritt konnten den jeweiligen Bauteilkategorien die Maßnahmen zugeordnet werden, die zur Erzielung einer über die Lebensdauer ausreichenden Dauerhaftigkeit notwendig sind.

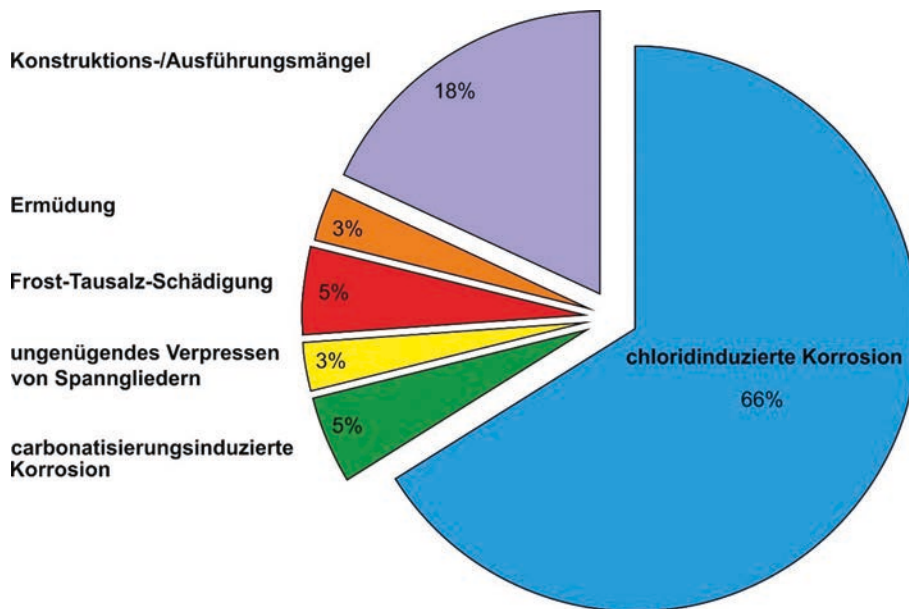
## 100 years durability for bridge and tunnel constructions – The variable 3-stage concept

After a relatively short period of use (about 20 years), very high levels of chloride were detected in the components of traffic structures (tunnel walls, emergency walkways, bridge piers, abutments, bridge caps) exposed to chloride impact. On some components, the resulting reinforcement corrosion had already progressed to such an extent that an exchange/demolition of the corresponding components had to be made. In order to be able to plan and execute more durable structures in the future, the so-called 3-step-concept was developed in which a total of three approaches to increase the durability are available and can be assigned individually to the different components. In the derivation of the variable 3-step concept, various durability-related damages of traffic structures were first analyzed in order to identify the areas that are still not adequately protected by the normative durability requirements. At the same time, the factors influencing the durability (salt, traffic intensity, removal of the chloride source from the component, component orientation) were worked out, so that a meaningful classification of the components could be made with knowledge of damages and impacts. Based on the factors influencing the resistance side (concrete cover, material resistance concrete and steel, surface protection system), three solution strategies were developed with which the durability of components exposed to chlorides can be improved. Essentially, this is a slow-down in chloride transport through concrete-technological measures, an increase in critical corrosion-inducing chloride content by using reinforcing steel with increased corrosion resistance, and inhibiting chloride entry into the structural concrete by applying hydrophobic treatment. In the last step, it was possible to assign the measures necessary to the respective component categories to achieve a durability that is sufficient over the entire service life.

## 1 Einleitung

Im Bereich der Bundesfernstraßen gibt es aktuell 39 562 Brücken mit einer Gesamtbrückenfläche von 30,7 Mio. m<sup>2</sup> [1]. Die überwiegende Anzahl der Bauwerke ist bezogen auf die Brückenfläche Betonbrücken (17 % Stahlbetonbrücken und 70 % Spannbetonbrücken [1]). Die beiden Autobahndirektionen Nord- und Südbayern betreuen zusammen ca. 10 % des Brückenbestands der Bundesfernstraßen und 18 Straßentunnel.

Um auch im Winter die Sicherheit der Autofahrer zu gewährleisten und um witterungsbedingte Verkehrsbehinderungen weitestgehend zu vermeiden, werden seit den 1970er Jahren Tausalze eingesetzt. Die durch die Taumittel eingebrachten Chloride dringen in den Beton ein und können ab einem bestimmten kritischen Chloridgehalt im Bauteil Bewehrungskorrosion auslösen. Der Anteil erforderlicher Betoninstandsetzungen von Schäden an Brücken und sogar notwendige Abbrüche von Bauwerken infolge von chloridinduzierter Bewehrungskorrosion sind im



**Bild 1** Verteilung der Schadensursachen an Betonoberflächen von Brückenbauwerken im deutschen Autobahnnetz [2]  
Causes of concrete damages occurred at German Highway bridges [2]

Vergleich zu anderen Schadensmechanismen am höchsten, Bild 1. Die daraus entstehenden wirtschaftlichen und auch volkswirtschaftlichen Schäden sind enorm.

Es werden als Ausgangssituation typische Schäden an Brücken und Tunneln exemplarisch dargestellt und die Einflussfaktoren auf die Intensität der Schäden herausgearbeitet. Daraus werden mögliche Lösungsstrategien entwickelt und anschließend ein variables 3-Stufen-Konzept für die künftigen Ausschreibungen von Betonbauteilen vorgestellt.

## 2 Beispiele

### 2.1 Allgemeines

In diesem Abschnitt werden exemplarisch Schäden an einem Brückenbauwerk und an zwei Tunneln beschrieben und die sich daraus ergebenden Fragestellungen bzgl. Einflussgrößen sowie langfristige Lösungsstrategien for-

muliert. Für die Herstellung der beschriebenen Bauwerke wurden Betone mit Portlandzement verwendet. (Hinweis: Als Grenzwert für den kritischen Chloridgehalt, ab dem ein sachkundiger Planer die Korrosionsgefahr bewerten muss, wird gemäß Rili SIB [3] ein Chloridgehalt von 0,5 M.-%/z angesetzt.)

### 2.2 Brücke BW 17 im Zuge der A94 (Autobahnkreuz München Ost)

Das Brückenbauwerk BW 17 überführt die A94 über die Bundesautobahn A99 (Autobahnring München). Das Bauwerk ist in vier Teilbauwerke unterteilt. Die beiden mittleren Teilbauwerke (TBW 2 und TBW 3) wurden im Jahre 1973 errichtet, Bild 2. Die südliche Verbreiterung (TBW 4) wurde 1999, die nördliche Verbreiterung (TBW 1) im Jahr 2004 gebaut. Die Widerlager und die drei Pfeilerreihen bestehen aus Stahlbeton. Ein Teil der Pfeiler wurde im Jahr 2005 mit einer Tiefenhydrophobierung verse-



**Bild 2** AK München Ost, BW 17, Baujahr 1973 und Verbreiterungen von 1999 bzw. 2004  
Highway interchange Munich East, years of construction: 1973, 1999, 2004





**Bild 3** Schäden an den Stegen der Spannbetonträger über den Lkw-Spuren (AK München Ost, BW 17)  
Damages at prefabricated concrete girders above „truck lane“ (Highway interchange Munich East)

hen, da die Pfeiler, auch die des TBW 4, sehr hohe Chloridgehalte aufwiesen und bereits Abplatzungen über korrodierenden Bewehrungsseisen festgestellt wurden. Der vierfeldrige Überbau des Bauwerks besteht aus mehrstegigen Spannbetonfertigteilen mit einer durchlaufenden Ort-betonplatte.

Im Zuge der Bauwerksuntersuchung nach DIN 1076 [4] wurden im Jahr 2014 vertiefte Untersuchungen zur Dauerhaftigkeit durchgeführt. Neben den Schäden am ursprünglichen Bauwerk zeigte sich, dass auch die Dauerhaftigkeit der in den Jahren 1999 und 2004 fertiggestellten Teilbauwerke bereits beeinträchtigt war. An der Brückenunter-sicht waren die Schäden an den Stegen der Fertigteile über den Lkw-Spuren deutlich ausgeprägter als über den anderen Spuren. In Bereichen mit geringen Betondeckungen kam es an der Untersicht der Spannbetonfertigteile aufgrund sehr hoher Chloridgehalte auf Höhe der Bewehrung bereits zu großflächigen Abplatzungen, Bild 3.

In Bezug auf die übrigen Bauteile wurde Folgendes festgestellt:

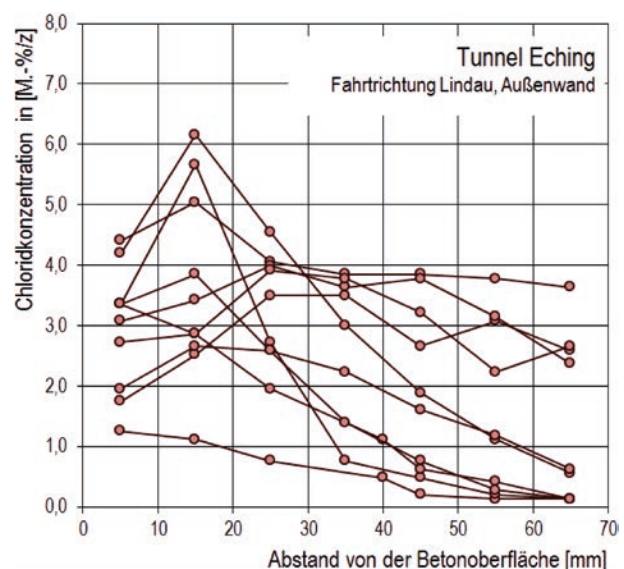
- Der Überbau, über den die A94 führt, wies an der Oberseite ausnahmslos Chloridgehalte im Bereich des Eigenchloridgehalts des Betons auf. D. h., wenn die Abdichtung intakt und somit der Beton geschützt ist, ist die Dauerhaftigkeit des Betons auch nach fast 50 Jahren sehr gut.
- Bei den im Jahr 2005 verstärkten Pfeilern mit einer aufgetragenen Tiefenhydrophobierung wurden lediglich in der 1. Tiefenlage (0–20 mm) erhöhte Chloridgehalte bis i. M. 0,7 M.-%/z festgestellt, tiefer lag der Chloridgehalt in der Größenordnung des Eigenchloridgehalts.
- Die Widerlager des ursprünglichen Bauwerks wiesen bis auf Höhe der Bewehrung hohe korrosionsauslösende Chloridgehalte auf.
- Die 2005 hergestellten Widerlager wiesen bis in die 2. Tiefenlage (20–40 mm) Chloridgehalte über 1,0 M.-%/z auf.

Das Bauwerk musste aufgrund der starken Schäden an den Spannbetonträgern abgebrochen werden.

## 2.3 Tunnel Eching und Tunnel Etterschlag

In der Zeit von 2011 bis 2015 wurden an den Tunnelbauwerken Eching und Etterschlag (Fertigstellung in den Jahren 1995 bzw. 1998) umfangreiche Zustandserfassungen der Tunnelwände und -decken sowie der Notgehwege und Schlitzrinnen durchgeführt. Zu diesem Zweck wurden Potentialfeld-, Betondeckungs- sowie Elektrolyt-widerstandsmessungen und tiefengestaffelte Bohrmehl-entnahmen zur Chloridgehaltsbestimmung durchgeführt und lokal Bewehrung sondiert.

Bei den Untersuchungen zur Bewertung der Gefahr von Bewehrungskorrosion zeigte sich in beiden Tunneln, dass alle Tunnelwände fast über die komplette Höhe unerwartet hohe Chloridgehalte aufwiesen. Dabei zeigt sich wider Erwarten nur eine vergleichsweise geringe Abnahme der Chloridgehalte mit zunehmender Höhe der Entnahmestelle und keine systematische Abnahme der Chloridgehalte mit zunehmendem Abstand vom Tunnelportal, d. h., erhöhte Chloridgehalte liegen nahezu über die ge-



**Bild 4** Ergebnisse der Chloridgehaltsbestimmungen an der Außenwand des Tunnels Eching, Fahrtrichtung Lindau  
Results of chloride content measurements at outer wall of tunnel Eching



**Bild 5** Aktive Bewehrungskorrosion in den Notgehwegen der Tunnelbauwerke Eching und Etterschlag  
Active reinforcement corrosion in emergency walkways of tunnels Eching and Etterschlag

samte Tunnellänge und Wandhöhe vor. Beispielhaft sind in Bild 4 die Ergebnisse der Bohrmehlentnahmen aus dem Tunnel Eching für die am stärksten belastete Außenwand (Fahrtrichtung Lindau) dargestellt.

Lokale Bewehrungs Sondierungen im Bereich von Rissen oder Betonierfehlstellen in beiden Tunneln ergaben an einzelnen Bewehrungsstäben korrosionsbedingte Querschnittsverluste von bis zu rd. 50%. Die Chloridgehalte in den Schlitzrinnen und Notgehwegen waren bis in eine Tiefe des Betons von 100 mm stark erhöht. Zum Teil wurden Querschnittsverluste von bis zu 100% festgestellt, Bild 5.

Die Chloridgehalte in den Tunneldecken erwiesen sich in beiden Tunneln als unkritisch. Es ist an dieser Stelle anzumerken, dass die Untersichten von Tunneldecken in Ortbetonbauweise grundsätzlich eine glatte Untersicht haben.

## 2.4 Fazit

Die beschriebenen Brücken und Tunnel stehen stellvertretend für eine Vielzahl vergleichbarer Infrastrukturbauwerke, bei denen die planmäßige Nutzungsdauer ebenfalls nur durch umfangreiche Instandsetzungsmaßnahmen erreicht werden kann. Daraus leiten sich für die Planung und den Betrieb von Ingenieurbauwerken in Bezug auf eine zukünftige Verbesserung der Dauerhaftigkeit zwei zentrale Fragestellungen ab:

1. Welche Einflussfaktoren sind maßgeblich für die Dauerhaftigkeit von Stahlbeton- bzw. Spannbetonbauteilen?
2. Durch welche Maßnahmen kann künftig bei neu zu errichtenden Infrastrukturbauwerken die Dauerhaftigkeit gegenüber chloridinduzierter Bewehrungskorrosion derart verbessert werden, dass die planmäßige Nutzungsdauer ohne umfangreiche Instandsetzungsmaßnahmen erreicht werden kann?

## 3 Beschreibung der dauerhaftigkeitsrelevanten Einflussfaktoren

### 3.1 Allgemeines

Auf ein Bauteil wirkt eine Beanspruchung (Einwirkung), deren Größe statistisch verteilt ist. Der Widerstand des

Bauteils, dieser Beanspruchung zu widerstehen, ist ebenfalls statistisch verteilt. Um die Dauerhaftigkeit von Verkehrsbauwerken zu verbessern, mussten in einem ersten Schritt relevante Einwirkungen und Widerstände identifiziert werden.

## 3.2 Einflussfaktoren auf der Einwirkungsseite

Nach einer Analyse verschiedener Brücken mit Schäden konnten auf der Einwirkungsseite folgende Einflussfaktoren für die Intensität von Schäden als Folge chloridinduzierter Bewehrungskorrosion identifiziert werden:

### Streusalzaufkommen

Tausalze werden seit Anfang der 1970er Jahre auf Autobahnen eingesetzt. Heute werden neben den Feuchtsalzen auch häufig Solemischungen verwendet, die in flüssiger Form auf die Fahrbahn gesprüht werden. Dabei wird das Stahlbetonbauteil direkt und unmittelbar mit einer Salzlösung beaufschlagt, was im Gegensatz zur Verwendung von Feuchtsalzen zu einer Beschleunigung der Chlorid-Eindringprozesse führt.

### Verkehrsintensität

Grundsätzlich ist für die Höhe der Chlorideinwirkung die Frequentierung bzw. die Verkehrsintensität und somit das Streuverhalten maßgebend. Entsprechend sind Bauwerke an Autobahnen und Bundesstraßen einer hohen Chloridbeanspruchung ausgesetzt, während Bauwerke angrenzend an Landes-, Kreis oder Gemeindestraßen eine vergleichsweise niedrige Beaufschlagung erfahren. Spritzwasser- und Sprühneblerzeugung durch Lkw findet im Vergleich zu Pkw in einem größeren Radius und einer höheren Intensität statt. Aus diesem Grund sind die Bauteile, die direkt neben der Lkw-Spur liegen, häufig besonders stark beansprucht. Erschwerend kommt hinzu, dass der Lkw-Verkehr stetig zunimmt.

### Entfernung der Chloridquelle vom Bauteil

Maßgebend für die Chlorideinwirkung ist auch die Entfernung des Bauteils von der Chloridquelle. Man kann unterscheiden zwischen einer direkten Spritzwasserbeaufschlagung (z.B. Brückenpfeiler in bis zu 6 m Entfernung von der Straße) und einer abgeschwächten Spritz-

wasserbeaufschlagung (z. B. Widerlager mit > 6 m Entfernung von der Straße).

## Bauteilausrichtung

Bauwerksuntersuchungen an Verkehrsbauwerken zeigen, dass die Bauteilausrichtung von entscheidender Bedeutung ist. Unterschieden werden muss zwischen horizontalen Flächen, vertikalen Flächen und Untersichten. Bei den Untersichten muss zusätzlich unterschieden werden, ob es sich um gegliederte oder nicht gegliederte Querschnitte handelt, da z. B. die Untersuchungen an Überführungen mit gegliederten Querschnitten gezeigt haben, dass die Stege deutlich höher belastet sind als die nicht gegliederte, horizontale Untersicht, vgl. Abschn. 2.2. Bei vertikalen Flächen z. B. von Pfeilern und Widerlagern ist auch von Bedeutung, ob diese Flächen dem Regen ausgesetzt sind oder nicht.

### 3.3 Einflussfaktoren auf der Widerstandsseite

Die folgenden Einflussfaktoren auf der Widerstandsseite sind bei chloridbeanspruchten Brückenbauwerken von Bedeutung:

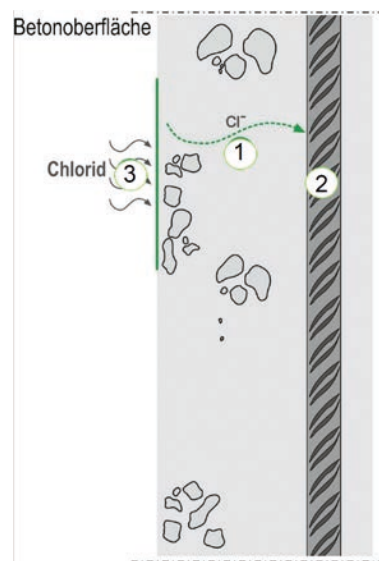
- Betondeckung,
- Materialwiderstand Beton (w/z-Wert, Bindemittelkombination),
- Materialwiderstand Betonstahl (z. B. normaler Stahl, nichtrostender Stahl, verzinkter Stahl, Glasfaserbewehrung),
- Oberflächenschutzsystem für den Beton vorhanden.

## 4 Lösungsstrategien

### 4.1 Allgemeines

Chloridinduzierte Korrosion tritt bei Stahlbetonbauteilen auf, bei denen Chloride von der Bauteiloberfläche zur Bewehrungsfläche transportiert werden und infolge von Aufkonzentrationen der Chloridgehalt auf Bewehrungshöhe den kritischen korrosionsauslösenden Chloridgehalt von Betonstahl überschreitet. Daraus ergeben sich im Hinblick auf den Materialwiderstand, vgl. auch Abschn. 3.3, bei der Planung und Ausführung von Brückenbauwerken nach [5] drei mögliche Lösungsstrategien (Bild 6), um Korrosion zu unterbinden oder die Korrosionsinitiierung so weit zeitlich zu verschieben, dass während der Nutzungsdauer nicht von einer relevanten Schädigung auszugehen ist:

1. Verlangsamen des Chloridtransports zur Bewehrung durch betontechnologische Maßnahmen (Umsetzung im Rahmen der Ausführung),
2. Erhöhen des kritischen korrosionsauslösenden Chloridgehalts durch Verwenden von Bewehrungsstahl mit erhöhtem Korrosionswiderstand (Umsetzung im Rahmen der Ausführung),
3. Unterbinden des Chlorideindringens in den Konstruktionsbeton durch Aufbringen einer Tiefenhydropho-



**Bild 6** Mögliche Strategien zur Verbesserung der Dauerhaftigkeit  
Possible strategies for improvement of durability

bierung (auch nach Ausführung möglich, „Rückfallebene“).

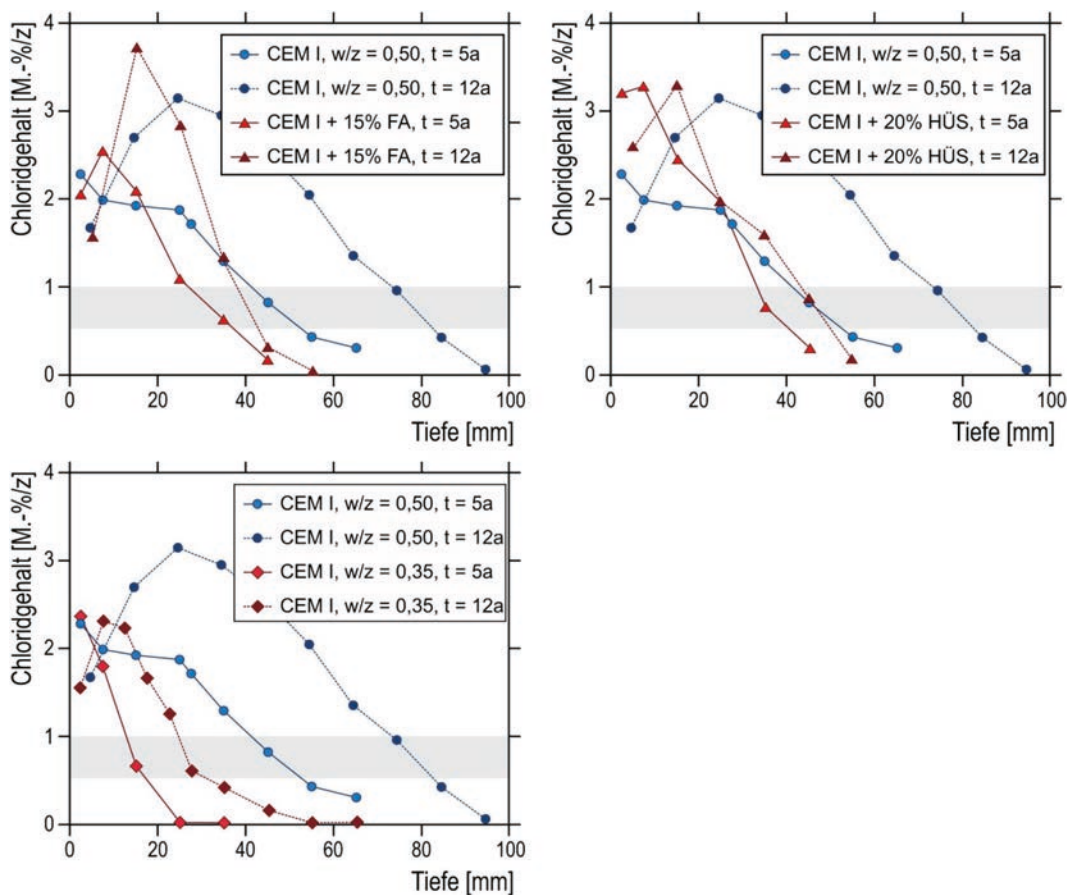
### 4.2 Verlangsamen des Chloridtransports durch betontechnologische Maßnahmen

Der Transport von Chloriden von der Bauteiloberfläche ins Bauteilinnere findet primär im Kapillarporensystem des Zementsteins statt. Dementsprechend stellen alle Maßnahmen, die eine Reduzierung des Kapillarporenanteils und eine generelle Verfeinerung der Porenstruktur bedingen, eine wirksame Maßnahme zur Reduzierung des Chloridtransports dar. Betontechnologische Maßnahmen zur Reduzierung des Kapillarporenanteils sind hinlänglich bekannt und in der Literatur umfassend beschrieben, z. B. [6, 7]. Für den Anwendungsfall des Konstruktionsbetons für Infrastrukturbauwerke sind dies neben dem w/z-Wert im Wesentlichen:

- die Verwendung hüttensandhaltiger Zemente (CEM II/B-S, CEM III/A),
- die Zugabe von Steinkohlenflugasche.

Während die Reduzierung des w/z-Werts zu einer erhöhten Rissbildungsfahr führen kann, wirken sich die Verwendung von hüttensandhaltigen Zementen oder die Zugabe von Steinkohlenflugasche aufgrund der langsameren Hydratationsreaktion auch auf die Hydratationswärmeentwicklung und die Rissbildungsfahr positiv aus. In Bild 7 ist der Einfluss der drei beschriebenen Maßnahmen auf das Chlorideindringverhalten anhand von Ergebnissen der Auslagerungsversuche am Naxbergtunnel über einen Betrachtungszeitraum von zwölf Jahren dargestellt [8]. Diese belegen eindrucksvoll den Effekt betontechnologischer Maßnahmen auf den Chloridtransport, wobei bei Einsatz eines Zements mit höherem Hüttensandgehalt, z. B. CEM II/B-S oder CEM III/A, noch mit einer deutlichen Zunahme dieses Effekts zu rechnen ist.





**Bild 7** Einfluss betontechnologischer Maßnahmen auf den Chloridtransport in Betonprobekörpern (Ergebnisse von Auslagerungsversuchen im Versuchsstand am Naxbergtunnel) [8]  
Influence of concrete-technological measures on chloride transport in concrete specimens (Results of exposure tests in the "Naxberg tunnel" in Switzerland) [8]

#### 4.3 Erhöhen des kritischen korrosionsauslösenden Chloridgehalts $C_{krit}$ durch Verwenden von Bewehrungsstahl mit erhöhtem Korrosionswiderstand

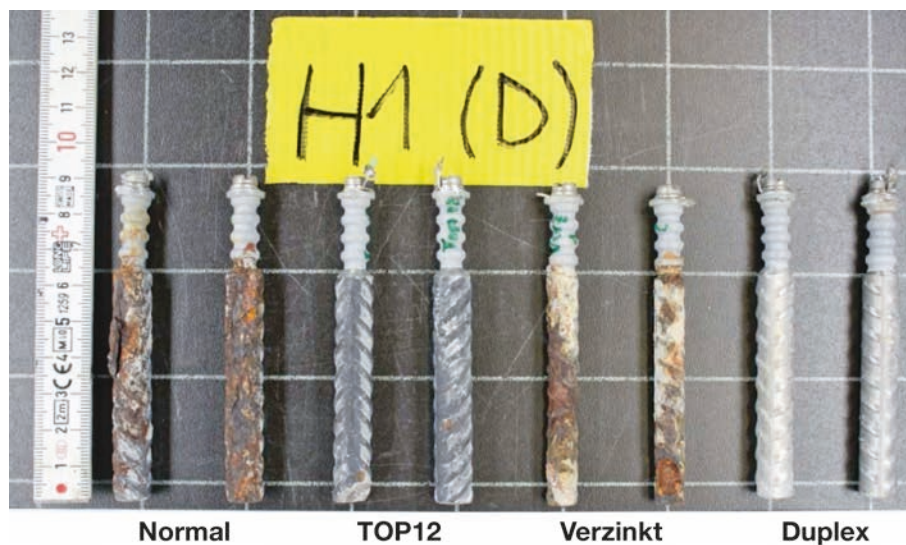
Durch den Einsatz nichtrostender Bewehrungsstähle kann der kritische korrosionsauslösende Chloridgehalt signifikant erhöht werden. In Deutschland wurden als nichtrostende Betonstähle vorwiegend austenitische Stähle der Güte 1.4571 (seltener 1.4429 oder 1.4529) oder austenitisch-ferritische Duplex-Stähle 1.4362 bzw. 1.4462 eingesetzt. Bei diesen Stahlgüten kann Korrosion bei den meisten Anwendungen zielsicher ausgeschlossen werden. Allerdings beschränkt sich ihre Anwendung aufgrund des signifikant höheren Preises unverändert auf Sonderanwendungen.

Eine Alternative zu den hochlegierten nichtrostenden Betonstählen stellen Betonstähle aus der ferritischen Stahlsorte 1.4003 dar. Dabei handelt es sich um Bewehrungsstahl mit einem Chromgehalt zwischen 10,5% und 12,5%. Preislich ordnen sich Betonstähle mit erhöhtem Korrosionswiderstand aus 1.4003 zwischen den herkömmlichen Betonstählen und den hochlegierten, nichtrostenden Stählen ein. Gleichzeitig führt die Verwendung dieses Stahls ebenfalls zu einer signifikanten Verschiebung des kritischen korrosionsauslösenden Chlorid-

gehalts. Seit 2016 liegt für Top12-Stahl der Firma Swiss Steel aus dem Werkstoff 1.4003 eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung durch das DIBt im Abmessungsbereich 8–14 mm vor (B500B NR) [9] und seit 2018 für die Nenndurchmesser von 16–28 mm (B670B NR) [10]. Laborversuche von BISSCHOP et al. [11] ergaben gegenüber herkömmlichem Betonstahl annähernd eine Vervierfachung von  $C_{krit}$ . In den vergangenen Jahren wurde dieser Stahl bei verschiedenen Brücken und Tunnelbauwerken im Rahmen von Pilotanwendungen eingebaut und wird mittels Korrosionsmonitoring-Systemen überwacht, z. B. Brücke über die kleine Laber, Tunnel Eching/Etterschlag, [12, 13].

Neben Betonstahl mit erhöhtem Korrosionswiderstand wurde zur Erhöhung der Dauerhaftigkeit in verschiedenen Neubauprojekten auch verzinkter Betonstahl eingebaut und ebenfalls mittels Korrosionsmonitoring-Systemen überwacht, z. B. im Naxbergtunnel und in den Kapfenberger Tunnelbauwerken Eching und Etterschlag, z. B. [13].

Auch für verzinkte Betonstähle liegen allgemeine bauaufsichtliche Zulassungen durch das DIBt vor, z. B. [14]. Allerdings ist bekannt, dass die Zinkschicht verzinkter Stähle bei Chloridgehalten über 1 M.-%/z ebenfalls korrodiert und somit bis zum Einsetzen der Korrosion am



**Bild 8** Vergleich der Korrosion an ausgebauten Stahlproben aus unlegiertem Betonstahl, Top12-Stahl, verzinktem Stahl und Duplex-Stahl (Versuchsstand Naxbergtunnel) [8]  
Comparison of corrosion occurred at removed steel probes of unalloyed reinforcement steel, Top12-steel, galvanized steel and duplex steel (test stand Naxberg tunnel) [8]

Betonstahl nur mit einer Verlängerung der Lebensdauer des verzinkten Stahls im Vergleich zum normalen Bewehrungsstahl um wenige Jahre zu rechnen ist [15].

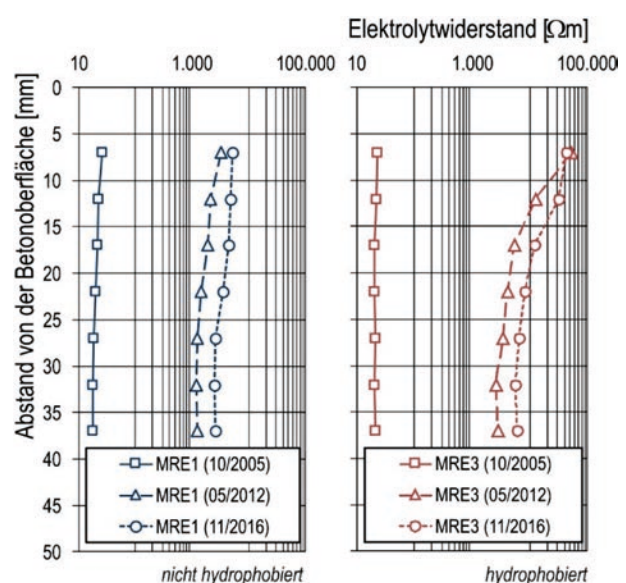
Für den Naxbergtunnel [8] liegen bereits Ergebnisse mit verschiedenen Stahlsorten vor. Es zeigte sich, dass nach zwölfjähriger Auslagerung bei Stahlproben aus unlegiertem Betonstahl rd. 70% der Stahloberfläche korrodierten. Der verzinkte Stahl verhielt sich ähnlich wie der normale Bewehrungsstahl, im Vergleich dazu zeigten die Top12-Stahlproben nahezu keine Korrosion und der Duplex-Stahl war blank, Bild 8.

#### 4.4 Unterbinden des Chlorideintrags

Das Unterbinden des Chlorideintrags durch Aufbringen eines Oberflächenschutzsystems oder einer Beschichtung gehört bei Parkbauten auch an den vertikalen Stützen- und Wandfüßen zur Standardausführung. Im Außenbereich ist die Applikation von Beschichtungen aufgrund der besonderen klimatischen Bedingungen und der Anforderungen an den Betonuntergrund, insbesondere an den Feuchtegehalt, häufig schwierig, sodass bei vielen Verkehrsbauwerken bereits nach kurzer Nutzungsdauer ein Abwittern oder sogar flächiges Ablösen der Beschichtungen festgestellt wurde. Eine Alternative zu den herkömmlichen Beschichtungssystemen stellen Tiefenhydrophobierungen dar. Im Gegensatz zu den Beschichtungen, die eine geschlossene Schicht auf der Betonoberfläche bilden, dringen Tiefenhydrophobierungen bis zu mehrere Millimeter tief in das Betongefüge ein, kleiden die Porenwänden aus und verhindern so eine Wasseraufnahme des Betons [16]. Durch das Eindringen in das Porengefüge werden ein Ablösen der Hydrophobierung und eine schnelle Abwitterung im regulären Verkehrsbetrieb unterbunden. Zwar weisen auch Tiefenhydrophobierungen, die in der Regel Silane als Wirkstoff enthalten, eine Emp-

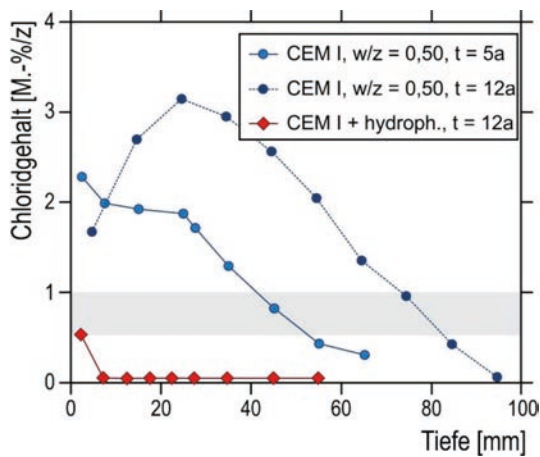
findlichkeit gegenüber den klimatischen Randbedingungen bei der Applikation auf, diese ist jedoch deutlich geringer als bei herkömmlichen Beschichtungssystemen.

Umfangreiche Erfahrungen zur Dauerhaftigkeit von Tiefenhydrophobierungen liegen in Deutschland bisher nicht vor. Untersuchungen an hydrophobierten und nicht hydrophobierten Probekörpern, die im Portalbereich des Tunnels Aubing im Verlauf der BAB A99 ausgelagert wurden und bei denen der Nachweis der Wirksamkeit über tiefengestaffelte Widerstandsmessungen mit Multi-ringelektroden erfolgte [17], deuten jedoch nach rd. zehn Jahren Auslagerungsdauer auf eine uneingeschränkte Funktionstüchtigkeit der Tiefenhydrophobierung hin, Bild 9.



**Bild 9** Einfluss einer Tiefenhydrophobierung auf den Elektrolytwiderstand von Betonprobekörpern (eigene Auslagerungsversuche Tunnel Aubing) [17]  
Influence of hydrophobic depth impregnation on the electric resistance of concrete specimens [17]





**Bild 10** Einfluss einer Tiefenhydrophobierung auf die Chloridaufnahme von Betonprobekörpern (Ergebnisse von Auslagerungsversuchen im Versuchsstand am Naxbergstunnel) [8]  
Influence of hydrophobic depth impregnation on chloride ingress of concrete specimens (Results of exposure tests in the "Naxbergstunnel" in Switzerland) [8]

Im Naxbergstunnel in der Schweiz wird seit mehreren Jahren ein Versuchsstand betrieben, bei dem im Labor hergestellte Versuchsplatten mit unterschiedlichen Betonen, Oberflächenbehandlungen und Stahlgüten ausgelagert und die Auswirkung dieser Variationen auf die Dauerhaftigkeit hinsichtlich chloridinduzierter Korrosion untersucht werden. Weitere Informationen hierzu enthält u. a. [8]. In diesem Zusammenhang wurde auch der Einfluss von Tiefenhydrophobierungen auf die Chloridaufnahme untersucht. Wie aus Bild 10 hervorgeht, kann durch Aufbringen einer Tiefenhydrophobierung über einen Betrachtungszeitraum von zwölf Jahren eine Chloridaufnahme praktisch vollständig unterbunden werden, wohingegen bei ansonsten gleichen Randbedingungen bei direkter Beaufschlagung der Betonoberflächen bis in große Tiefenlagen sehr stark erhöhte Chloridgehalte festgestellt werden.

Sowohl die Ergebnisse der Untersuchungen an den Probekörpern im Tunnel Aubing als auch im Naxbergstunnel deuten darauf hin, dass Tiefenhydrophobierungen bei richtiger Ausführung über einen langen Zeitraum eine sehr wirksame Maßnahme zum Unterbinden eines Chlorideintrags sein können. Allerdings ist eine Erneuerung zur Sicherstellung der langfristigen Dauerhaftigkeit über die Lebensdauer des Bauteils erforderlich.

## 5 Umsetzung in die Praxis

Bisher wird die Dauerhaftigkeit gegenüber chloridinduzierter Bewehrungskorrosion von Brückenbauwerken in der Stahlbeton- und Spannbetonbauweise nach ZTV-ING [18] indirekt über die Zuweisung bestimmter Betondeckungen und Expositionsklassen und damit verbundene Anforderungen an die Betonzusammensetzung berücksichtigt. Zahlreiche Schäden zeigen aber, dass für besonders stark beanspruchte Bauteile weitere Maßnahmen ergriffen werden müssen.

Unter dem variablen 3-Stufen-Konzept [13] versteht man eine maßgeschneiderte Kombination der drei oben beschriebenen Strategien, die in Abhängigkeit vom Bauteil und von den Umgebungsbedingungen festgelegt werden, Bild 11, um Betonbauteile individuell mit einer ausreichenden Dauerhaftigkeit auszustatten.

Im Falle von Stahlbetonbrücken werden die dauerhaftkeitsrelevanten Bauteile (beispielhaft in Bild 11 Kappe, Brückenpfeiler, Brückenuntersicht) im Hinblick auf die zu erwartende Einwirkung, Ausrichtung, Exposition und die anvisierte Lebensdauer kategorisiert. In Bezug auf die Zuweisung einer Expositionsklasse werden die Expositionsklassen an die ZTV-ING angelehnt, aber verschärft, wenn Erfahrungswerte hohes Schadenspotenzial zeigen, z. B. Kappen: XD3+. Für diese Bauteilkategorien und in

| Bauteilkategorie     | Ausrichtung                      | Expositionsklasse  | Präventivmaßnahmen |                                          | Zusatzmaßnahme  |
|----------------------|----------------------------------|--------------------|--------------------|------------------------------------------|-----------------|
|                      |                                  |                    | Beton<br>①         | Bewehrung<br>②                           | Oberfläche<br>③ |
| Kappe                | horizontal                       | XD3+, XF4          | x                  | x<br>Top12                               | x               |
| Brückenmittelpfeiler | vertikal                         | XD3, XF2<br>massig | x                  | x<br>Top12 (bis 5 m über OK<br>Fahrbahn) | x               |
| Brückenuntersicht    | Untersicht<br>(nicht gegliedert) | XD1<br>massig      | x                  | -                                        | x               |

Eignungsprüfung

Kontrollprüfung

**Bild 11** Das variable 3-Stufen-Konzept als Baukastenprinzip  
The variable 3-step-concept as modular system

Abhängigkeit von der Bauteildicke (massiges oder nicht massiges Bauteil) werden Betondeckungen festgelegt und betontechnologische Maßnahmen (w/z-Wert, Bindemittelkombination) vorgegeben. Je nach möglicher Schadensintensität wird ggf. zusätzlich nichtrostender Betonstahl als Zusatzmaßnahme vorgegeben (hier: Brückenkappen, Brückenmittelpfeiler bis in eine Höhe von 5 m über Oberkante Fahrbahn). So ist z.B. der Einsatz von Stahl der Güte 1.4003 mit einer rd. vierfachen Erhöhung von  $C_{krit}$  gegenüber herkömmlichem Betonstahl für die Bewehrung der hoch beanspruchten Mittelpfeiler eines Brückenbauwerks zur Sicherstellung einer Lebensdauer von 100 Jahren erforderlich, während bei einer mäßig beanspruchten Tunneluntersicht eine betontechnologische Optimierung ausreichend ist.

Für die verschiedenen Bauteilkategorien und Betonzusammensetzungen werden vollprobabilistische Lebensdauerberechnungen durchgeführt und bindemittelabhängige Chloridmigrationskoeffizienten (Bauteilkenngröße zur Beschreibung des Materialwiderstands gegenüber Chlorideindringen) abgeleitet. Die Chloridmigrationskoeffizienten werden in der Leistungsbeschreibung verankert und müssen im Rahmen von Eignungsprüfungen vor Beginn der Maßnahme vom vorgesehenen Beton erreicht werden.

Zahlreiche Erfahrungen haben gezeigt, dass die Dauerhaftigkeit nur dann erreicht werden kann, wenn die Ausführung qualitativ hochwertig ist. Um dies sicherzustellen, sieht das variable 3-Stufen-Konzept nach der Ausfüh-

rung eine Qualitätskontrolle der dauerhaftigkeitsrelevanten Materialeigenschaften durch den Auftraggeber vor, z.B. mittels Bestimmung des Chloridmigrationskoeffizienten  $D_{RCM}$  am Bauwerk. Wird der in den Eignungsprüfungen erreichte Zielwert nicht erreicht, so ist auf Kosten der ausführenden Firma im Rahmen einer „Rückfallebene“ zur Sicherstellung der Dauerhaftigkeit eine Tiefenhydrophobierung auf das betroffene Bauteil aufzubringen.

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

Zahlreiche Schäden an zum Teil noch relativ jungen Betonbauwerken zeigen, dass die Intensität der Chlorideinwirkung in den vergangenen Jahren aufgrund von verschiedenen Einflussfaktoren zugenommen hat. Um zukünftig Schäden zu minimieren, wurde im Rahmen dieses Beitrags ein Konzept vorgestellt, wie Bauwerke dauerhafter gebaut und somit aus wirtschaftlicher und volkswirtschaftlicher Hinsicht sehr aufwendige Instandsetzungen an stark frequentierten Brückenbauwerken vermieden bzw. langfristig minimiert werden können. Neben den im Beitrag vorgestellten Maßnahmen ist zur Erzielung einer ausreichenden Dauerhaftigkeit auch der Einbau eines präventiven kathodischen Korrosionsschutzsystems denkbar.

Dieser Beitrag wurde in ausführlicherer Form im Tagungsband des 28. Dresdner Brückenbausymposium veröffentlicht [19].

## Literatur

- [1] Homepage BAST: <http://www.bast.de/DE/Statistik/Bruecken/Brueckenstatistik.pdf> (Stand 01.09.2017).
- [2] SCHIESSL, P.; MAYER, T. F.: *Lebensdauermanagementsystem – Teilprojekt A2*. In: Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb, Hrsg.): Schriftenreihe des DAfStb, Heft 572, Schlussberichte zur ersten Phase des DAfStb/BMBF-Verbundforschungsvorhabens „Nachhaltig Bauen mit Beton“, Berlin: Beuth, 2007, S. 49–100.
- [3] Richtlinie „Schutz und Instandsetzung von Betonbauteilen“ (Rili-SIB 2001). Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Ausgabe 2001.
- [4] DIN 1076:1999-11: *Ingenieurbauwerke im Zuge von Straßen und Wegen – Überwachung und Prüfung*.
- [5] MAYER, T. F.; SCHIESSL-PECKA, A.: *Lösungsstrategien zur Chloridbelastung in Straßentunneln*. VSVI-Tagung Garching, 25. Januar 2017.
- [6] SCHIESSL, P.; GEHLEN, CH.; SODEIKAT, CH.; MAYER, T. F.; SCHIESSL-PECKA, A.: *Dauerhafter Konstruktionsbeton für Wasserbauwerke*. In: BERGMEISTER, K.; WÖRNER, H.-D. (Hrsg.): Betonkalender 2008, Vol. 97, Bd. 1, Berlin: Ernst & Sohn, 2008, S. 1–88.
- [7] GEHLEN, C.: *Probabilistische Nutzungsdauerbemessung von Stahlbetonbauwerken – Zuverlässigkeitsbetrachtungen zur wirksamen Vermeidung von Bewehrungskorrosion*. In: Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb, Hrsg.): Schriftenreihe des DAfStb, Heft 510, Berlin: Beuth, 2000.
- [8] BISSCHOP, J.; SCHIEGG, Y.; HUNKELER, F.: *Modelling the corrosion initiation of reinforced concrete exposed to deicing salts*. Forschungsbericht AGB 2011/002, TFB Wildegg, 2016 ([www.tfb.ch](http://www.tfb.ch)).
- [9] Homepage SCHMOLZ + BICKENBACH AG, Swiss Steel AG: [http://www.swiss-steel.com/fileadmin/files/swiss-steel.com/documents/dokumente/Unternehmensentwicklung/20160921\\_Allgemeine\\_bauaufsichtliche\\_Zulassung\\_Top12\\_Draht.pdf](http://www.swiss-steel.com/fileadmin/files/swiss-steel.com/documents/dokumente/Unternehmensentwicklung/20160921_Allgemeine_bauaufsichtliche_Zulassung_Top12_Draht.pdf)
- [10] Homepage SCHMOLZ + BICKENBACH AG, Swiss Steel AG: [http://www.swiss-steel.com/fileadmin/files/swiss-steel.com/documents/dokumente/Unternehmensentwicklung/Allgemeine\\_bauaufsichtliche\\_Zulassung\\_Z-1.4-272\\_Februar\\_2018.pdf](http://www.swiss-steel.com/fileadmin/files/swiss-steel.com/documents/dokumente/Unternehmensentwicklung/Allgemeine_bauaufsichtliche_Zulassung_Z-1.4-272_Februar_2018.pdf)
- [11] 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.
- [12] SCHIESSL-PECKA, A.; WILLBERG, U.; HOCKE, CH.; LINDEN, CH.: *Drei Praxisbeispiele für Verkehrsbauwerke – Maßnahmen zur Verbesserung der Dauerhaftigkeit*. In: WIEDERSPAHN, M. (Hrsg.): Tagungsband 17. Symposium Brückenbau in Leipzig, 14./15.02.2017 in Leipzig, S. 172–175.
- [13] SCHIESSL-PECKA, A.; SCHNECK, U.; WILLBERG, U.; GOJ, K.; HOCKE, CH.: *A96 Lindau – München, Tunnel Eching und Etterschlag – Umsetzung von Erhaltungsmaßnahmen und eines Konzepts zur Betoninstandsetzung im Zuge der Tunnelnachschrümpfungen nach RABT*. In: DGGT (Hrsg.): Taschenbuch für den Tunnelbau 2018, S. 180–219.

- [14] Homepage Institut Feuerverzinken GmbH – Industrieverband Feuerverzinken e.V.: <http://www.feuerverzinken.com/anwendungen/bauen/feuerverzinkter-betonstahl/bauaufsichtliche-zulassung/>.
- [15] BREIT, W.; OECHSNER, M.; BURKERT, A.: *Technologie- und Sicherheitszuwachs bei der Anwendung von feuerverzinktem Betonstahl zum Ausbau einer nachhaltigen Marktposition im Stahlbetonbau*. Schlussbericht zu IGF-Vorhaben Nr. 499 ZN/1, TU Kaiserslautern, Staatliche Materialprüfungsanstalt Darmstadt, Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), 2017.
- [16] SCHIESSL-PECKA, A.; SODEIKAT, CH.; MAYER, T. F.: *Three Examples of Using Hydrophobic Impregnations in Tunnels*. In: BEUSHAUSEN, H. (Ed.): fib Symposium 2016, Performance-Based Approaches for Concrete Structures, Proceedings: Extended abstracts and keynotes. 21.–23.11.2016 in Cape Town (South Africa), S. 505–506.
- [17] SODEIKAT, CH.: *Feuchtesensoren in der Bauwerksüberwachung*. Beton- und Stahlbetonbau 105 (2010), Heft 12, S. 770–777. DOI: <https://doi.org/10.1002/best.201000058>.
- [18] ZTV ING:2017 Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten.
- [19] SCHIESSL-PECKA, A.; WILLBERG, U.; MÜLLER, G.; GEHLEN, C.: *100 Jahre Dauerhaftigkeit für Brücken- und Tunnelbauwerke*. In: CURBACH, M. (Ed.): Tagungsband des 28. Dresdner Brückenbausymposium, Planung, Bauausführung, Instandsetzung und Ertüchtigung von Brücken. 12./13.03.2018 in Dresden, S. 157–168.

#### Autoren



Dr.-Ing. Angelika Schießl  
Ingenieurbüro Schießl · Gehlen · Sodeikat GmbH  
Landsberger Str. 370  
80687 München  
[schiessl-pecka@ib-schiessl.de](mailto:schiessl-pecka@ib-schiessl.de)



Prof. Dr.-Ing. Uwe Willberg  
Autobahndirektion Südbayern  
Seidlstraße 7–11  
80335 München  
[uwe.willberg@abdsb.bayern.de](mailto:uwe.willberg@abdsb.bayern.de)



Dipl.-Ing. Dipl.-Ing. Anne Rausch  
Ingenieurbüro Schießl · Gehlen · Sodeikat GmbH  
Landsberger Str. 370  
80687 München  
[rausch@ib-schiessl.de](mailto:rausch@ib-schiessl.de)



Dipl.-Ing. Wolfgang Bäuml  
Autobahndirektion Südbayern  
Seidlstraße 7–11  
80335 München  
[wolfgang.baeumler@abdsb.bayern.de](mailto:wolfgang.baeumler@abdsb.bayern.de)





# Top12 für Parkbauten

## Beschichten war gestern



Top12 – Der neue kostengünstige nichtrostende Betonstahl bietet dank einem Chromanteil von über 12 % einen zuverlässigen Schutz gegen Korrosion und macht neuralgische Bauteile von Parkbauten 6-mal langlebiger. Durch den selektiven Einsatz von Top12 kann konsequent auf Oberflächenschutzsysteme verzichtet werden. Beschichtungserneuerungen und Instandsetzungen werden vermeidbar, die Lebenszykluskosten sinken markant.

Member of Swiss Steel Group

