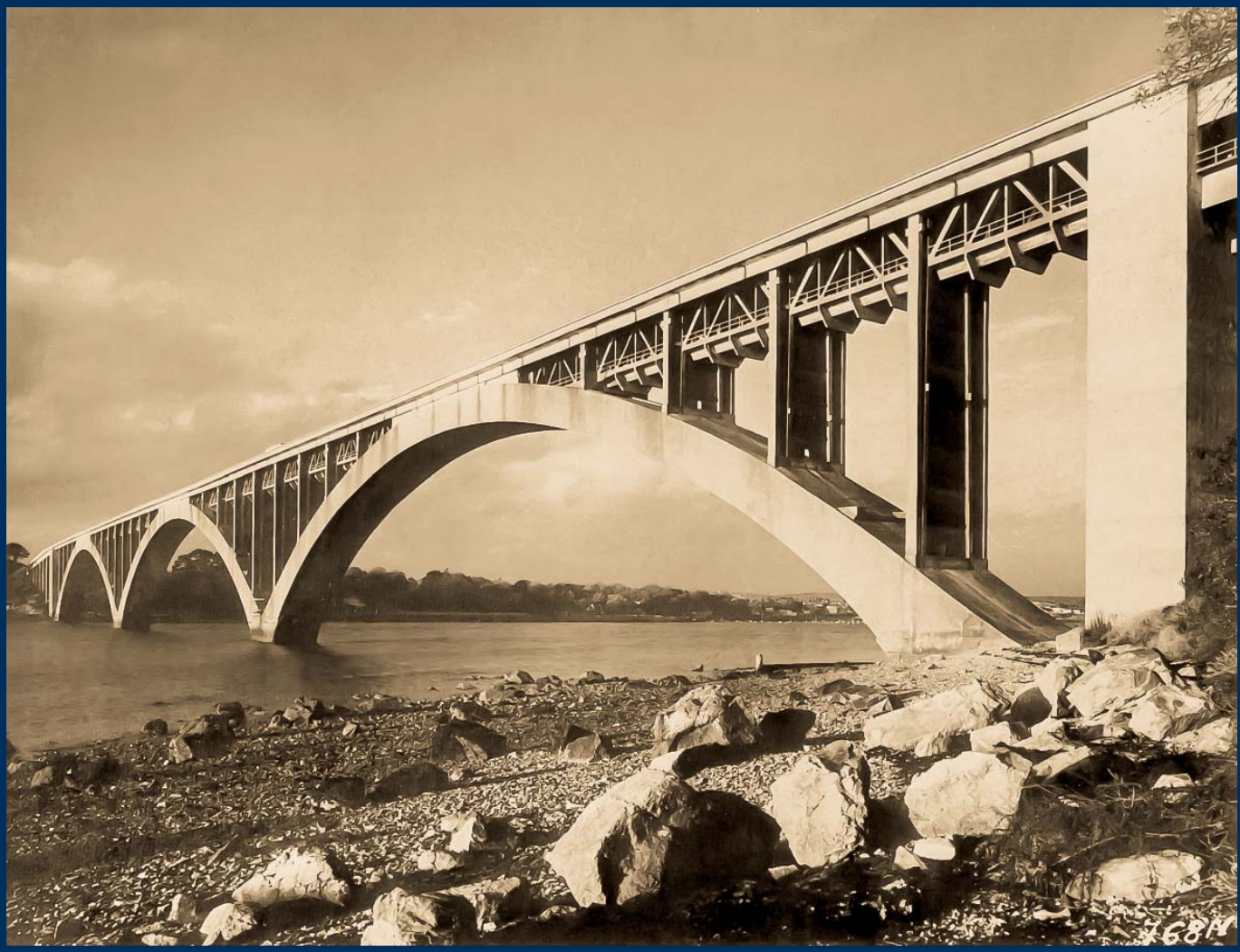
TECHNISCHE UNIVERSITÄT DRESDEN

FAKULTÄT BAUINGENIEURWESEN Institut für Massivbau www.massivbau.tu-dresden.de



28. DRESDNER BRÜCKENBAUSYMPOSIUM

PLANUNG, BAUAUSFÜHRUNG, INSTANDSETZUNG UND ERTÜCHTIGUNG VON BRÜCKEN

12./13. MÄRZ 2018

© 2018 Technische Universität Dresden
Alle Rechte vorbehalten.
Nachdruck, auch auszugsweise, nur mit schriftlicher Genehmigung des Herausgebers.
Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen, Handelsnamen oder sonstigen Kennzeichnungen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, dass diese von jedermann frei benutzt werden dürfen. Vielmehr kann es sich auch dann um eingetragene Warenzeichen oder sonstige gesetzlich geschützte Kennzeichen handeln, wenn sie als solche nicht eigens markiert sind.

Herausgeber:	Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Manfred Curbach Technische Universität Dresden Institut für Massivbau 01062 Dresden
Redaktion:	Silke Scheerer, Angela Heller
Layout:	Ulrich van Stipriaan
Anzeigen:	Harald Michler
Titelbild:	Plougastel Bridge, entnommen aus: Fernández Ordóñez, J. A.: Eugène Freyssinet. Barcelona: 2C Ediciones, 1978.
Druck:	addprint AG, Am Spitzberg 8a, 01728 Bannewitz / Possendorf

ISSN 1613-1169
ISBN 978-3-86780-544-5

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DRESDEN

Institut für Massivbau http://massivbau.tu-dresden.de

Tagungsband
28. Dresdner Brückenbausymposium

Institut für Massivbau
Freunde des Bauingenieurwesens e.V.
TUDIAS GmbH

12. und 13. März 2018

Inhalt

Herzlich willkommen zum 28. Dresdner Brückenbausymposium **9**
Prof. Dr.-Ing. habil. DEng/Auckland Hans Müller-Steinhagen

Vorwort zum 28. Dresdner Brückenbausymposium **13**
Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Manfred Curbach

Bauwerksentwürfe nach RE-ING – Was ist neu? **17**
TRDir Prof. Dr.-Ing. Gero Marzahn, TORR'in Yvonne-Christine Gunreben

Development of cable-stayed bridges in China
Entwicklung von Schrägkabelbrücken in China **25**
Yaojun Ge, Professor and PhD

Vom Rechnen und Wissen – Monitoring an den Talbrücken der Neubaustrecke Erfurt–Leipzig/Halle **41**
Prof. Dr.-Ing. Steffen Marx, Dipl.-Ing. Marc Wenner, Dipl.-Ing. Max Käding, Frederik Wedel M. Sc.

Nachrechnung und Ertüchtigung der Siegtalbrücke – größte Spannbetonbrücke der Sauerlandlinie (A45) **59**
Dr.-Ing. Karlheinz Haveresch

Der Rückbau der Lahntalbrücke Limburg (1964) **73**
Dr.-Ing. Stefan Franz, Dipl.-Ing. Frank Ansorge

Einsatz unbemannter Flugsysteme im Brückenbau **87**
Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirt.-Ing. Jens Otto, Dipl.-Ing. Cornell Weller

Eugène Freyssinet: "I was born a builder" **101**
Dr.-Ing. David Fernández-Ordóñez

Realisierung der Kienlesbergbrücke in Ulm – gestalterische und bauliche Herausforderungen im komplexen Baukontext **129**
Prof. Dr.-Ing. Jan Akkermann, Dipl.-Ing. Bartlomiej Halaczek

Die Taminabrücke in der Schweiz, der Heimat großer Brückenbauingenieure **141**
Dipl.-Ing. Volkhard Angelmaier

100 Jahre Dauerhaftigkeit für Brücken- und Tunnelbauwerke **157**
Dr.-Ing. Angelika Schießl-Pecka, Prof. Dr.-Ing. Uwe Willberg, Dipl.-Ing. Georg Müller, Prof. Dr.-Ing. Christoph Gehlen

Lebenszyklus- und Qualitätsspezifikationen für Ingenieurbauwerke **169**
Assoc. Prof. Dipl.-Ing. Dr. nat. techn. Alfred Strauss, Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Gerhard Lener, Dipl.-Ing. Johannes Schmid, Ass. Prof. Jose Matos, Univ. Prof. Joan R. Casas

Versagenshäufigkeit und Versagenswahrscheinlichkeit von Brücken **189**
Dr.-Ing. habil. Dirk Proske

Brückenvielfalt rund um die Ostsee – Bericht zur Brückenexkursion 2017 ..... **203**
Dipl.-Ing. Oliver Steinbock, Dipl.-Ing. Sebastian May

Chronik des Brückenbaus **215**
Zusammengestellt von Dipl.-Ing. (FH) Sabine Wellner

Inserentenverzeichnis **231**

100 Jahre Dauerhaftigkeit für Brücken- und Tunnelbauwerke

Dr.-Ing. Angelika Schießl-Pecka[1], Prof. Dr.-Ing. Uwe Willberg[2], Dipl.-Ing. Georg Müller[3], Prof. Dr.-Ing. Christoph Gehlen[4]

1 Einleitung

Im Bereich der Bundesfernstraßen gibt es aktuell 39562 Brücken mit einer Gesamtbrückenfläche von 30,7 Mio. m² [1]. Die überwiegende Anzahl der Bauwerke sind bezogen auf die Brückenfläche Betonbrücken (17 % Stahlbetonbrücken und 70 % Spannbetonbrücken [1]). Die beiden Autobahndirektionen Nord- und Südbayern betreuen zusammen ca. 10 % des Brückenbestandes 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 ist im Vergleich zu anderen Schadensmechanismen am höchsten, vgl. auch Bild 1. Die daraus entstehenden wirtschaftlichen und auch volkswirtschaftlichen Schäden sind enorm.

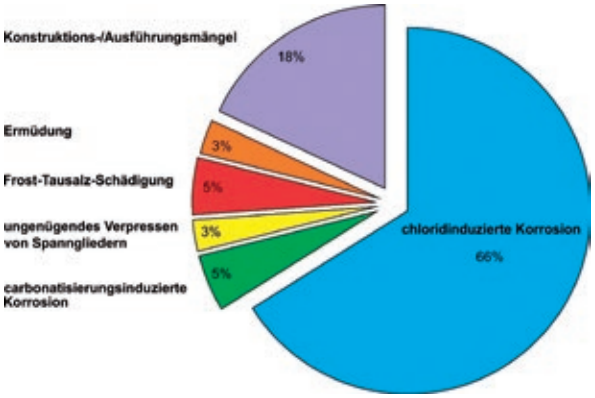


Bild 1 Verteilung der Schadensursachen an Betonoberflächen von Brückenbauwerken im deutschen Autobahnnetz Grafik: nach [2]

In diesem Beitrag 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 typische Schäden an verschiedenen Brückenbauwerken und an zwei Tunneln beschrieben und die sich daraus ergebenden Fragestellungen bzgl. Einflussgrößen sowie langfristige Lösungsstrategien formuliert. Wenn nicht anders erwähnt, ist davon auszugehen, dass für die Herstellung der beschriebenen Bauwerke Portlandzement verwendet wurde, ggfs. unter Zugabe von Kalksteinmehl.

2.2 Zwei Fertigteilbrücken über die A9

Im Zuge einer vertieften Untersuchung wurden zwei Brücken im Zuge der Bundesautobahn A9, Berlin–München, im Hinblick auf die Dauerhaftigkeit der Brückenuntersichten untersucht, Bilder 2 und 3. Die Brücken wurden 1986 bzw. 1998 in Fertigteilbauweise mit vorgespannten Fertigteilträgern aus B55 und mit einer durchlaufenden Ortbetonplatte hergestellt. Beide Brücken haben einen mehrstegigen Plattenbalkenquerschnitt. In der Untersuchung wurden jeweils der in Fahrtrichtung vorderste Steg des Plattenbalkens im Bereich über der Lkw-Spur an beiden Stirnseiten (direkt beaufschlagte und abgewandte Stirnseite) und an der Unterseite des Steges beprobt, z. T. an augenscheinlich erkennbaren Feuchterändern.

1 Ingenieurbüro Schießl Gehlen Sodeikat GmbH, München
2 Autobahndirektion Südbayern, München
3 Autobahndirektion Nordbayern, Bayreuth
4 TU München und Ingenieurbüro Schießl Gehlen Sodeikat GmbH, München

Bild 2 A9, BW 296a, Baujahr 1998
Foto: Autobahndirektion Nordbayern

Bild 3 A9, BW 260a, Baujahr 1986
Foto: Autobahndirektion Nordbayern

Die durchgeführten Bestimmungen der Carbonatisierungstiefe und die Bestimmung des Chloridgehalts (Tiefenlagen 0–20 mm, 20–40 mm und 40–50 mm) lassen sich folgendermaßen zusammenfassen:

- Die sehr geringen gemessenen Carbonatisierungstiefen – sie lagen zwischen 2 mm und 5 mm – deuten auf eine sehr regelmäßige Feuchtebeaufschlagung hin.

- Die Chloridgehalte sind bei beiden Bauwerken z. T. auch in der Tiefenlage 40–50 mm (Höhe der Bewehrung) noch deutlich erhöht (Chloridgehalt bis 3,2 Masseprozent, bezogen auf den Zementgehalt (M.-%/z)). (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.)

- Sind Feuchtespuren zu erkennen, ist die direkt beaufschlagte Stirnseite und die Untersicht des untersuchten vordersten Steges im Bereich der Lkw-Spur am höchsten beaufschlagt, die abgewandte Stirnseite weist eine geringfügig reduzierte Chloridbeaufschlagung auf (BW 296a).

- Sind keine Feuchtespuren zu erkennen, so sind die Chloridgehalte in der direkt beaufschlagten Stirnseite am höchsten (BW 260a), die Untersicht und die abgewandte Stirnseite der Lkw-Spur weisen aber auch in allen Tiefenlagen Chloridgehalte über dem kritischen Chloridgehalt von 0,5 M.-%/z nach [3] auf.

- Wenn der kritische korrosionsauslösende Chloridgehalt erreicht wird, sind die Bedingungen für eine Bewehrungskorrosion hervorragend (gute Belüftung, feucht etc.).

- Das Bauwerk BW 296a ist nur 19 Jahre alt. Die Stege sind umlaufend so hoch mit Chloriden beaufschlagt, dass es nach der Aussage der Autobahndirektion Nordbayern zu ersten Betonabplatzungen kommt.

2.3 Brücke Trockau

Bei der Talbrücke Trockau handelt es sich um eine etwa 602 m lange Spannbeton-Hohlkastenbrücke im Zuge der Bundesautobahn A9, Nürnberg–Berlin.

Die in den Jahren 1998 bis 2001 hergestellte Brücke weist je Fahrtrichtung (FR) einen neunfeldrigen, in Längs- und Querrichtung vorgespannten Kastenquerschnitt mit jeweils drei Fahrstreifen sowie einer Standspur auf. Die maximale Stützweite beträgt 100 m. Die Längsvorspannung wird mit extern geführten Spanngliedern im Hohlkasten erzeugt. Aufgrund von Abplatzungen und Korrosionsverfärbungen an den Kappen (Alter zum Untersuchungszeitpunkt rd. 14 Jahre) wurden vertiefte Untersuchungen durchgeführt. Die Chloridgehalte im ungerissenen Beton überstiegen an allen Messstellen auf Höhe der außenliegenden Bewehrung, teilweise auch auf Höhe der zweiten Bewehrungslage, den angenommenen kritischen korrosionsauslösenden Chloridgehalt von 0,50 M.-%/z. Anhand der Ergebnisse ließ sich kein Zusammenhang zwischen der Ausrichtung des Bauteils (waagrecht/senkrecht) und dem Chloridgehalt des Betons nachweisen. Dagegen konnte bei einem Vergleich der Ergebnisse der Potentialfeldmessungen mit den Ergebnissen der Chloridanalysen eine Korrelation zwischen Bereichen mit der größten Korrosionsaktivität und Bereichen mit den höchsten Chloridgehalten im Beton festgestellt werden. Im Bereich von Rissen war das Ausmaß der festgestellten Korrosion höher, die festgestellten Trenn- und oberflächennahen Risse waren aber nicht alleine ursächlich für die festgestellte Korrosion.

Da auf den Kappen der Talbrücke Trockau Leitplanken, Geländer und eine Lärmschutzwand montiert waren, wurden aufgrund des

Bild 4 AK München Ost, BW 17, Baujahr 1973, Teilbauwerke 1999, 2004 Foto: Autobahndirektion Südbayern

Zustands der Bewehrung drei der vier Kappen nach einer Nutzungsdauer von nur 14 Jahren abgerissen.

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

Das Brückenbauwerk BW 17 überführt die A94 über die Bundesautobahn A99, den Autobahnring München. Das Bauwerk ist in vier Teilbauwerke unterteilt. Die beiden mittleren Teilbauwerke (TBW 2 und TBW 3) wurden im Jahre 1973 errichtet, Bild 4. 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 versehen, da die Pfeiler, auch die des TBW 4, sehr hohe Chloridgehalte aufwiesen und bereits Abplatzungen über korrodierenden Bewehrungseisen festgestellt wurden. Der vierfeldrige Überbau des Bauwerks besteht aus mehrstegigen Spannbetonfertigteilen mit einer durchlaufenden Ortbetonplatte.

Im Zuge der Bauwerksuntersuchung nach DIN 1076 [4] wurden 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. Für die Brückenuntersicht, die sich über der A99 befindet, wurden die in Abschnitt 2.2 beschriebenen Ergebnisse bestätigt. Auch hier 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 bereits zu großflächigen Abplatzungen, vgl. Bild 5.

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 ist und der Beton geschützt, ist die Dauerhaftigkeit des Beton auch nach fast 50 Jahren sehr gut.

Bild 5 Schäden an den Stegen der Spannbetonträger über den Lkw-Spuren (AK München Ost, BW 17)
Fotos: Autobahndirektion Südbayern

- Bei den im Jahr 2005 verstärkten Pfeilern mit einer aufgebrachten 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.

2.5 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) durch verschiedene Ingenieurbüros umfangreiche Zustandserfassungen der Tunnelwände und -decken sowie der Notgehwege und Schlitzrinnen durchgeführt. Zu diesem Zweck wurden Potentialfeld-, Betondeckungs- sowie Elektrolytwiderstandsmessungen und tiefengestaffelte Bohrmehlentnahmen 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 gesamte Tunnellänge und Wandhöhe vor. Beispielhaft sind in Bild 6 die Ergebnisse der Bohrmehlentnahmen aus dem Tunnel Eching für die am stärksten belastete Außenwand (Fahrtrichtung Lindau) dargestellt.

Die Chloridgehalte in den Tunnelwänden des Tunnels Etterschlag sind oberflächennah ebenfalls sehr stark erhöht, allerdings sind die Chloridgehalte in größeren Tiefenlagen tendenziell geringer als im Tunnel Eching, was in erster Linie auf die höhere Betongüte und damit einhergehend geringere Kapillarporosität des Betons zurückzuführen ist.

Lokale Bewehrungssondierungen 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, vgl. Bild 7.

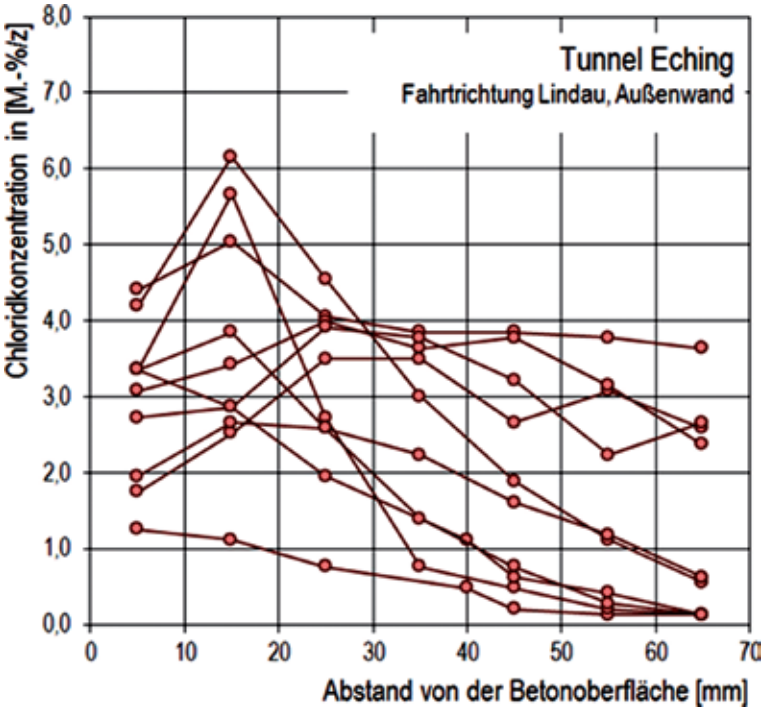


Bild 6: Ergebnisse der Chloridgehaltsbestimmungen an der Außenwand des Tunnels Eching, Fahrtrichtung Lindau
Grafik: Ingenieurbüro Schießl Gehlen Sodeikat GmbH

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.

2.6 Fazit

Die beschriebenen Brücken 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 Brücken in Bezug auf eine zukünftige Verbesserung

Bild 7 Aktive Bewehrungskorrosion in den Notgehwegen der Tunnelbauwerke Eching und Etterschlag
Foto: Ingenieurbüro Schießl Gehlen Sodeikat GmbH

der Dauerhaftigkeit zwei zentrale Fragestellungen ab:

1. Welche Einflussfaktoren sind maßgeblich für die Dauerhaftigkeit von Stahlbeton- bzw. Spannbetonbrücken?

2. Durch welche Maßnahmen kann künftig bei Brücken die Dauerhaftigkeit gegenüber chloridinduzierter Bewehrungskorrosion derart verbessert werden, dass die planmäßige Nutzungsdauer ohne umfangreiche Instandsetzungsmaßnahmen erreicht werden kann (Lösungsstrategien für Neubauprojekte)?

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, Bundesstraßen und Kreisstraßen einer hohen Chloridbeanspruchung ausgesetzt, während Bauwerke angrenzend an Gemeindestraßen, Feldwege und Eisenbahnen eine vergleichsweise niedrige Beaufschlagung erfahren. Spritzwasser- und Sprühnebelerzeugung durch Lkws findet im Vergleich zu Pkws 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 Beaufschlagung (z. B. Kappenoberseite) oder einer Spritzwasserbeaufschlagung (z. B. Brückenpfeiler in bis zu 5 m Entfernung von der Straße) bzw. einer Sprühnebelbeaufschlagung (z. B. Brückenpfeiler mit mehr als 5 m Entfernung von der Straße oder Brückenuntersicht bei bis zu 10 m lichter Höhe).

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. Abschnitt 2.2. Bei vertikalen Flächen z. B. von Pfeilern und Widerlagern ist entscheidend, 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, COMbar),
- ❑ Oberflächenschutzsystem.

4 Lösungsstrategien

4.1 Allgemeines

Chloridinduzierte Korrosion tritt bei Stahlbetonbauteilen auf, bei denen Chloride von der Bauteiloberfläche zur Bewehrungsoberfläche 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 Abschnitt 3.3, bei der Planung und Ausführung von Brückenbauwerken nach [5] drei mögliche Lösungsstrategien (vgl. auch Bild 8), 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),

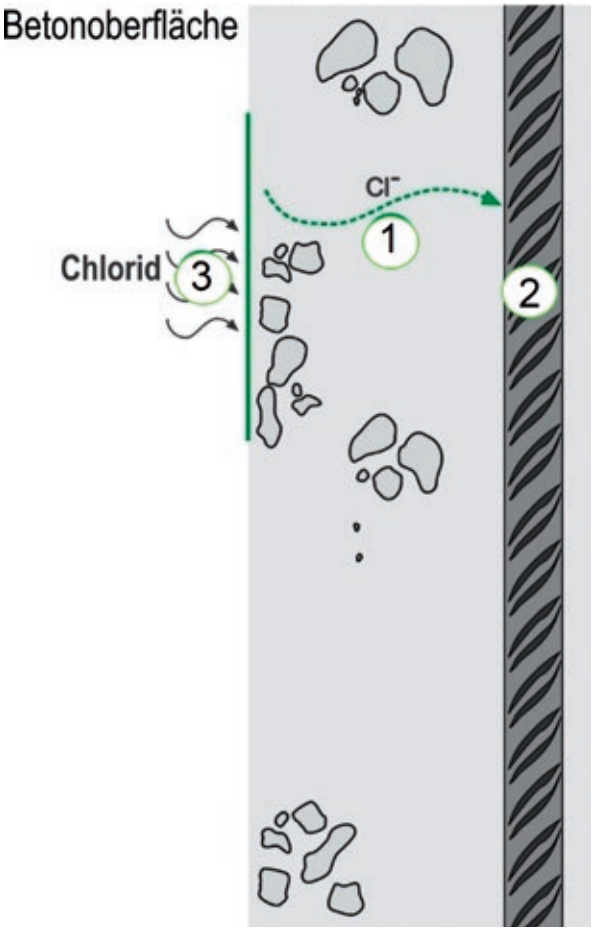


Bild 8 Mögliche Strategien zur Verbesserung der Dauerhaftigkeit
Grafik: nach [5], Ingenieurbüro Schießl Gehlen Sodeikat GmbH

3. Unterbinden des Chlorideindringens in den Konstruktionsbeton durch Aufbringen einer Tiefenhydrophobierung (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 im Wesentlichen:

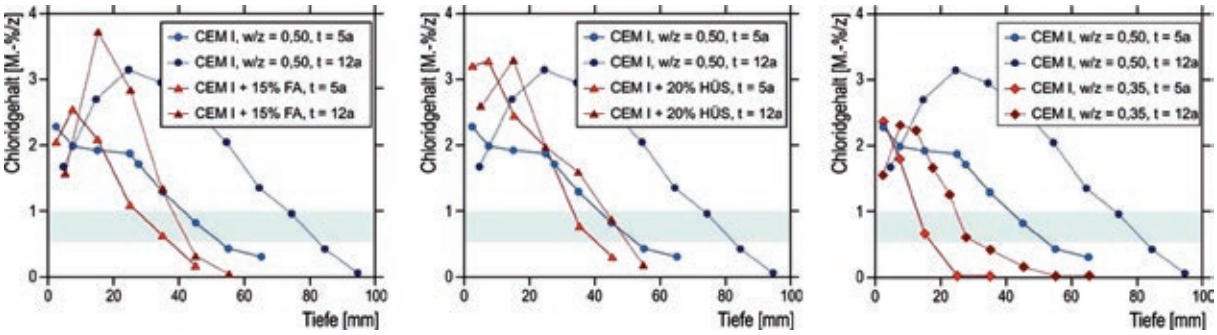


Bild 9 Einfluss betontechnologischer Maßnahmen auf den Chloridtransport in Betonprobekörpern (Ergebnisse von Auslagerungsversuchen im Versuchsstand am Naxbergtunnel) Grafik: nach [8]

- ❑ 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 Rissbildungsgefahr führen kann, wirken sich die Verwendung von hüttensandhaltigen Zementen oder die Zugabe von Steinkohlenflugasche aufgrund der langsameren Hydratationsreaktion auch auf die Hydratationswärmeentwicklung und die Rissbildungsgefahr positiv aus. In Bild 9 ist der Einfluss der drei beschriebenen Maßnahmen auf das Chlorideindringverhalten anhand von Ergebnissen der Auslagerungsversuche am Naxbergtunnel über einen Betrachtungszeitraum von 12 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.

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 einen warmgewalzten Bewehrungsstahl mit einem Chromgehalt >12 %. 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 Chloridgehalts. Laborversuche von Bisschop et al. [9] ergaben gegenüber herkömmlichem Betonstahl annähernd eine Verdopplung von C_{krit}. Wird zusätzlich durch Beizen noch die Walzhaut entfernt, führt dies gemäß [9] in Laborversuchen zu einer weiteren Steigerung von C_{krit} gegenüber herkömmlichem Betonstahl ungefähr auf den Faktor 4. Seit 2016 liegt für Top12-Stahl der Firma Swiss Steel aus dem Werkstoff 1.4003, bei dem die Walzhaut durch Beizen entfernt wird, eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung durch das DIBt im Abmessungsbereich 8–14 mm vor [10]. In den vergangenen Jahren wurde Top12-Stahl bei verschiedenen Brücken und Tunnelbauwerken im Rahmen von Pilotanwendungen eingebaut und werden mittels Korrosionsmonitoring-Systemen überwacht, z. B. Brücke über die kleine Laber, Tunnel Eching/Etterschlag, [11] und [12].

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 Kappen der Tunnelbauwerke Eching und Etterschlag, z. B. [12]. Auch für verzinkte Betonstähle liegen allgemeine bauaufsichtliche Zulassungen durch das DIBt vor, z. B. [13]. Allerdings ist bekannt, dass die Zinkschicht verzinkter Stähle bei Chloridgehalten über 1 M.-%/z ebenfalls korrodiert und somit bis zum Einsetzen der Korrosion am Betonstahl nur mit einer Verlängerung der Lebensdauer des verzinkten

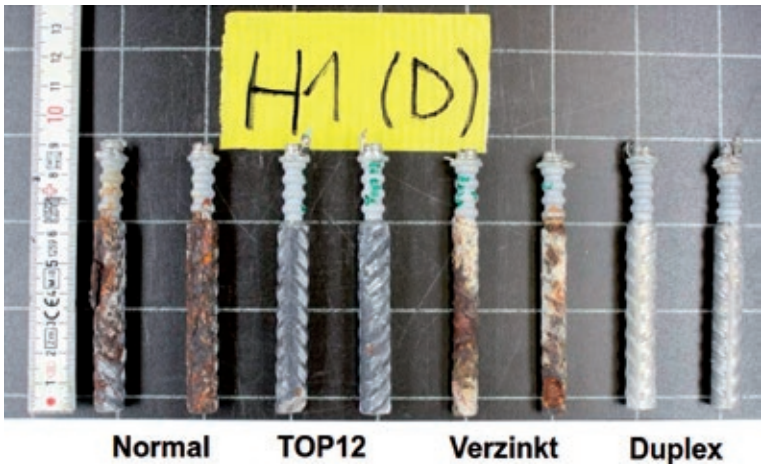


Bild 10 Vergleich der Korrosion an ausgebauten Stahlproben aus unlegiertem Betonstahl, Top12-Stahl, verzinktem Stahl und Duplex-Stahl (Versuchsstand Naxbergtunnel) Grafik: aus [8]

Stahls im Vergleich zum normalen Bewehrungsstahl um wenige Jahre zu rechnen ist [14].

Für den Naxbergtunnel [8] liegen bereits Ergebnisse mit verschiedenen Stahlsorten vor. Es zeigte sich, dass nach 12-jähriger Auslagerung bei Stahlproben aus unlegiertem Betonstahl rund 70 % der Stahloberfläche korrodierten. Der verzinkte Stahl verhielt sich ähnlich wie der normale Bewehrungsstahl, im Vergleich dazu zeigten die Top12-Stahlproben (auch mit Walzhaut) nahezu keine Korrosion und der Duplex-Stahl war blank, vgl. Bild 10.

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, so dass 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 Porenwandungen aus und verhindern so eine Wasseraufnahme des Betons [15]. 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 Empfindlichkeit gegenüber den klimatischen Randbedingungen bei der Applikation auf, diese ist jedoch deutlich geringer als bei herkömmlichen Beschichtungssystemen.

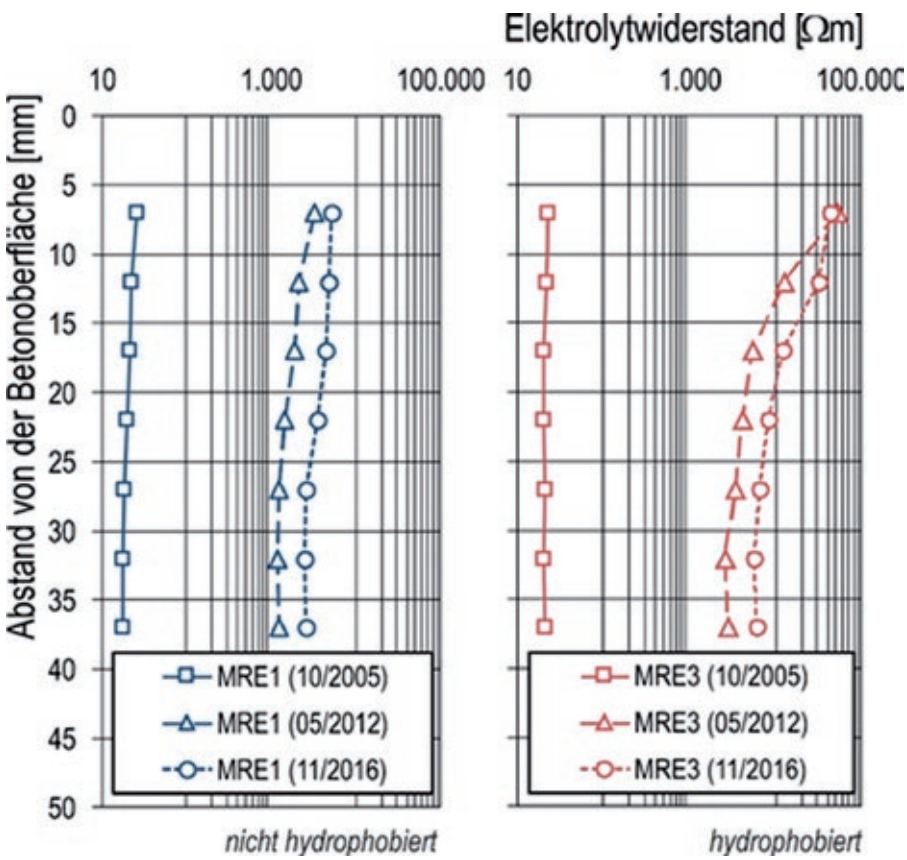


Bild 11 Einfluss einer Tiefenhydrophobierung auf den Elektrolytwiderstand von Betonprobekörpern (eigene Auslagerungsversuche Tunnel Aubing) Grafik: aus [16]

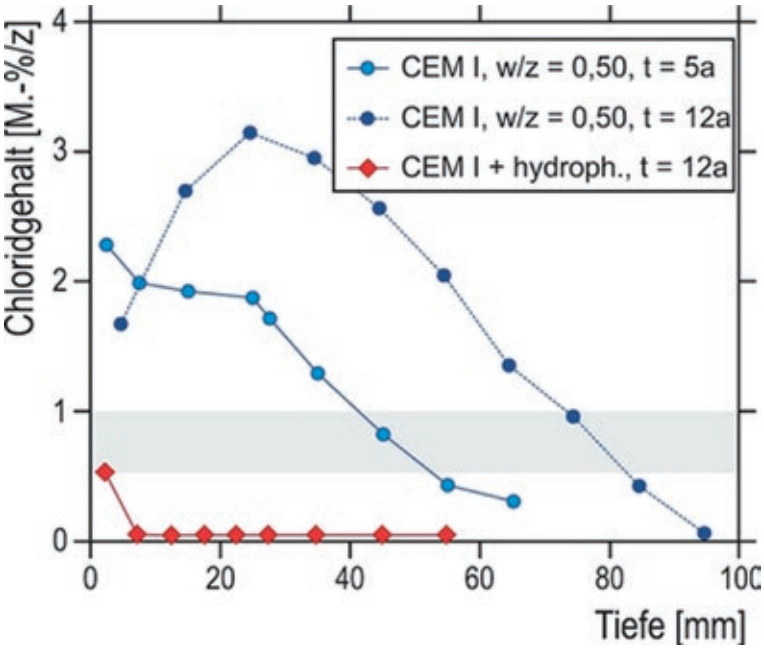


Bild 12 Einfluss einer Tiefenhydrophobierung auf die Chloridaufnahme von Betonprobekörpern (Ergebnisse von Auslagerungsversuchen im Versuchsstand am Naxbergtunnel)
Grafik: aus [8]

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 Multiringelektroden erfolgte [16], deuten jedoch nach rd. zehn Jahren Auslagerungsdauer auf eine uneingeschränkte Funktionstüchtigkeit der Tiefenhydrophobierung hin, Bild 11.

Im Naxbergtunnel 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 12 hervorgeht, kann durch Aufbringen einer Tiefenhydrophobierung über einen Betrachtungszeitraum von 12 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 wurden.

Sowohl die Ergebnisse der Untersuchungen an den Probekörpern im Tunnel Aubing als auch im Naxbergtunnel 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 Bauteiles erforderlich.

5 Umsetzung in die Praxis

Bisher wird die Dauerhaftigkeit gegenüber chloridinduzierter Bewehrungskorrosion von Brückenbauwerken in der Stahlbeton- und Spannbetonbauweise nach ZTV-ING [17] 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 [12] versteht man eine maßgeschneiderte Kombination der drei oben beschriebenen Strategien, die in Abhängigkeit des Bauteils und der Umgebungsbedingungen festgelegt werden, vgl. Bild 13, um Betonbauteile individuell mit einer ausreichenden Dauerhaftigkeit auszustatten.

Im Falle von Stahlbetonbrücken werden die dauerhaftigkeitsrelevanten Bauteile (beispielhaft in Bild 13 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 Schadenspotential zeigen, z. B. Kappen: XD3+. Für diese Bauteilkategorien und in Abhängigkeit 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 (z. B. Top12-Stahl) als Zusatzmaßnahme vorgegeben (hier: Brückenkappen, Brückenmittelpfeiler bis in eine Höhe von 3 m über Oberkante Fahrbahn). So ist z. B. der Ein-

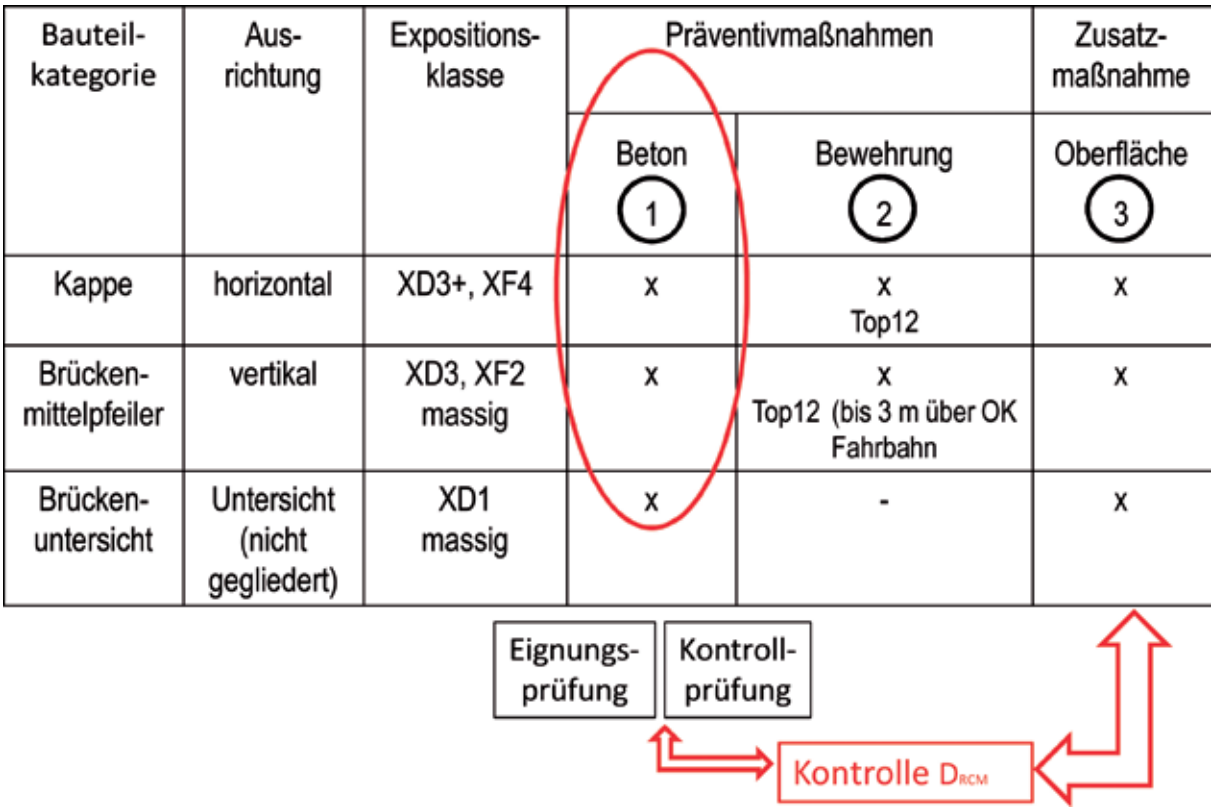


Bild 13 Das variable 3-Stufen-Konzept als Baukastenprinzip

Grafik: Ingenieurbüro Schießl Gehlen Sodeikat GmbH

satz von Top12-Stahl 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 von dem 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 Ausführung 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

Zahlreiche Schäden an zum Teil noch relativ jungen Bauwerken 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 Sicht sehr aufwendige Instandsetzungen an stark frequentierten Brückenbauwerken vermieden bzw. minimiert werden können.

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: Deut-

scher 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] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb., Hrsg.): Richtlinie Schutz und Instandsetzung von Betonbauteilen (Rili-SIB 2001). 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).

[9] v. Greve-Dierfeld, S.; Bisschop, J.; Schiegg, Y.: Nichtrostende Bewehrungsstähle zur Verlängerung der korrosionsfreien Lebensdauer von Stahlbetonbauwerken. Beton- und Stahlbetonbau 112 (2017) 9, S. 601–610 – DOI: 10.1002/best.201700038.

[10] 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.

[11] Schießl-Pecka, A.; Willberg, U.; Hocke, Ch.; Linden, Ch.: Drei Praxisbespiele für Verkehrsbauwerke – Maßnahmen zur Verbesserung der Dauerhaftigkeit. In: Wiederspahn, M.: (Hrsg.): Tagungsband 17. Symposium Brückenbau in Leipzig, 14./15.02.2017 in Leipzig, 172–175.

[12] Schießl-Pecka, A.; Schneck, U.; Willberg, U.; Goj, K.; Hocke, Ch.: A96 Lindau – München, Tunnel Eching und Etterschlag – Umsetzung von Erhaltungsmaßnahmen und eines Konzeptes zur Betoninstandsetzung im Zuge der Tunnelnachrüstungen nach RABT. In: DGGT (Hrsg.): Taschenbuch für den Tunnelbau 2018, S. 180–219.

[13] Homepage Institut Feuerverzinken GmbH – Industrieverband Feuerverzinken e.V.: http://www.feuerverzinken.com/anwendungen/bauen/feuerverzinkter-betonstahl/bauaufsichtliche-zulassung/.

[14] 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.

[15] 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.

[16] Sodeikat, Ch.: Feuchtesensoren in der Bauwerksüberwachung. Beton- und Stahlbetonbau 105 (2010) 12, S. 770–777 – DOI:10.1002/best.201000058.

[17] ZTV ING:2017: Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten.

Anm.: Alle Internetquellen wurden am 20.12.2017 geprüft.

9 Herzlich willkommen zum 28. Dresdner Brückenbausymposium

13 Vorwort zum 28. Dresdner Brückenbausymposium

17 Bauwerksentwürfe nach RE-ING – Was ist neu?

25 Development of cable-stayed bridges in China

41 Vom Rechnen und Wissen –
Monitoring an den Talbrücken der Neubaustrecke Erfurt–Leipzig/Halle

59 Nachrechnung und Ertüchtigung der Siegtalbrücke –
größte Spannbetonbrücke der Sauerlandlinie (A45)

73 Der Rückbau der Lahntalbrücke Limburg (1964)

87 Einsatz unbemannter Flugsysteme im Brückenbau

101 Eugène Freyssinet: "I was born a builder"

129 Realisierung der Kienlesbergbrücke in Ulm –
gestalterische und bauliche Herausforderungen im komplexen Baukontext

141 Die Taminabrücke in der Schweiz, der Heimat großer Brückenbauingenieure

157 100 Jahre Dauerhaftigkeit für Brücken- und Tunnelbauwerke

169 Lebenszyklus- und Qualitätsspezifikationen für Ingenieurbauwerke

189 Versagenshäufigkeit und Versagenswahrscheinlichkeit von Brücken

203 Brückenvielfalt rund um die Ostsee – Bericht zur Brückenexkursion 2017

215 Chronik des Brückenbaus

231 Inserentenverzeichnis

ISSN 1613-1169
ISBN 978-3-86780-544-5