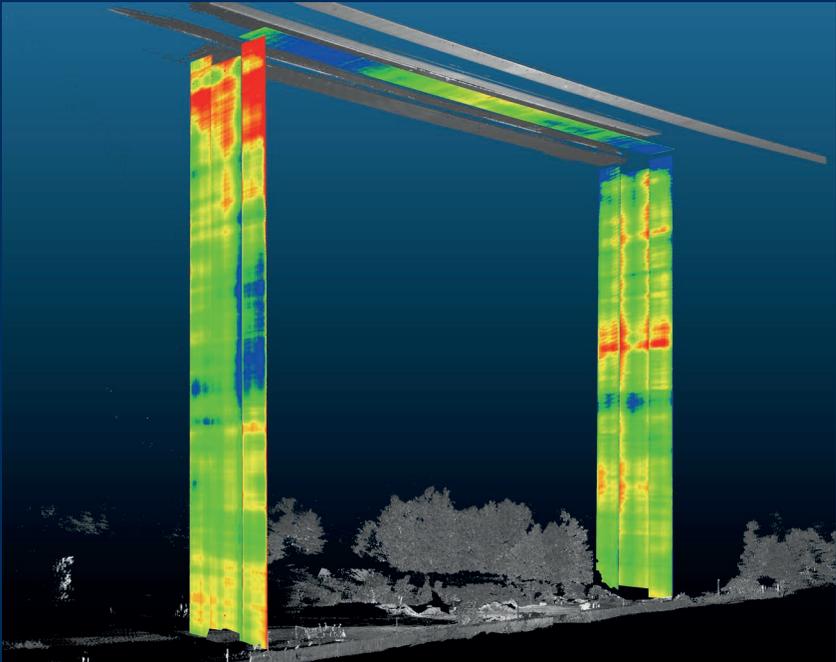




**TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DRESDEN**

FAKULTÄT BAUINGENIEURWESEN

Schriftenreihe
Konstruktiver Ingenieurbau Dresden
Heft 55



Manfred Curbach, Steffen Marx,
Silke Scheerer, Torsten Hampel (Hrsg.)

**11. SYMPOSIUM
EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN
VON BAUKONSTRUKTIONEN**

08. März 2021



**TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DRESDEN**

FAKULTÄT BAUINGENIEURWESEN

Manfred Curbach, Steffen Marx,
Silke Scheerer, Torsten Hampel (Hrsg.)

**11. SYMPOSIUM
EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN
VON BAUKONSTRUKTIONEN**

08. März 2021

Schriftenreihe
Konstruktiver Ingenieurbau Dresden
Heft 55

Herausgeber der Reihe:

Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Manfred Curbach
Prof. Dr.-Ing. Peer Haller
Prof. Dr.-Ing. habil. Ulrich Häußler-Combe
Prof. Dr.-Ing. habil. Michael Kaliske
Prof. Dr.-Ing. Steffen Marx
Prof. Dr.-Ing. Richard Stroetmann

Institut für Massivbau
Technische Universität Dresden
D - 01062 Dresden

Tel. +49 351 463-3 65 68
Fax +49 351 463-3 72 89

© 2021 Technische Universität Dresden

Alle Rechte vorbehalten. Nachdruck, auch auszugsweise, nur mit schriftlicher Genehmigung der Herausgeber. 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. Für die Inhalte sind die Autor*innen verantwortlich.

Herausgeber: Manfred Curbach, Steffen Marx, Silke Scheerer, Torsten Hampel
Redaktion: Silke Scheerer
Layout: Stefan Gröschel und Silke Scheerer
Korrekturen: Silke Scheerer, Sabine Wellner und Theresa Fritsche
Anzeigen: Sabine Wellner
Umschlag und Druckvorbereitung: Stefan Gröschel

Titelbild: 3D-Punktwolke des fünften Feldes der Siegtalbrücke; zur Veranschaulichung wurden bereichsweise unterschiedliche Einfärbungen verwendet: Intensitätswerte (Graustufendarstellung) und Ebenheitsabweichungen (Regenbogendarstellung) | © Dr.-Ing. Florian Schill, Fachgebiet Geodätische Messsysteme und Sensorik, TU Darmstadt Institut für Geodäsie

Der Tagungsband ist open access auf der Homepage des Instituts für Massivbau der TU Dresden verfügbar: <https://tu-dresden.de/bu/bauingenieurwesen/imb>.

Druck: addprint AG · Am Spitzberg 8a · 01728 Bannewitz

Veröffentlicht: Dresden, März 2021

ISSN 1613-6934
ISBN 978-3-86780-665-7

Inhalt

Grußwort	5
Torsten Hampel, Sabine Wellner und Silke Scheerer	
Experimentelle Untersuchung von Balkenreihentragwerken	8
Oliver Steinbock, Olaf Mertzsch und Sabine Wellner	
Experimentell gestützte Nachweise von Eisenbahn-Stampfbetonbrücken	20
Marc Gutermann und Werner Malgut	
Berührungslose Überwachung von Brücken mit großer Stützweite	32
Florian Schill und Gregor Schacht	
Ultraschalluntersuchung von Baukonstruktionen	46
Sebastian Schulze	
Monitoring von Kräften und signifikanten Bauwerksparametern in einer Stahlbetonbrücke zur Analyse von Schädigungsprozessen	54
Jens Kühnapfel, Gunter Hahn, Markus Fischer und Stefan Mortag	
Structural Health Monitoring der Maintalbrücke Gemünden zur Unterstützung einer prädiktiven Instandhaltung	66
Ralf Herrmann, Ronald Schneider, Patrick Simon, Falk Hille, Samir Said und Matthias Baeßler	
Rissweitenmessung mittels nachträglich angebrachten, verteilten faseroptischen Messsystemen	78
Alois Vorwagner, Maciej Kwapisz, Werner Lienhart, Madeleine Winkler und Urs H. Grunicke	
Verbesserte Bestimmung des Chloridgehaltes in Beton durch neues Messverfahren	88
Fritz Binder und Stefan L. Burtscher	
Spanndrahtbruchdetektion mit Schallemissionsmonitoring	96
Max Käding, Gregor Schacht und Steffen Marx	
Ansätze zur objektspezifischen Ermittlung und Bewertung von KKS-Schutzkriterien	106
Ulrich Schneck	
Probebelastung einer mit Carbonbeton verstärkten Plattenbrücke	118
Oliver Steinbock, Nina Josiane Giese und Manfred Curbach	
Experimentelle Tragfähigkeitstests des OML in den Jahren 2019 und 2020	130
Sabine Wellner, Torsten Hampel und Silke Scheerer	

Verbesserte Bestimmung des Chloridgehaltes in Beton durch neues Messverfahren

DI (FH) Fritz Binder¹, Priv.Doz. Dipl.-Ing. Dr.techn. Stefan L. Burtscher²

¹ ASFINAG Baumanagement GmbH, Asset Management, Wien

² burtscher consulting GmbH, Wien

KURZFASSUNG

Im Straßennetz der ASFINAG befinden sich über 5.000 Brückenobjekte, wovon ein überwiegender Anteil in Stahlbeton- bzw. Spannbetonbauweise errichtet wurde. Viele Bauteile, insbesondere deren Stützen, sind einer sehr hohen Belastung durch Chlorid ausgesetzt. Dies führt früher oder später zu einer Verringerung der Dauerhaftigkeit und beeinträchtigt langfristig die Lebensdauer. Instandsetzungen werden in der Regel daher notwendig. Grundlage für Zeitpunkt und Ausmaß der Instandsetzung bildet der im Zuge von Brückenprüfungen festgestellte Erhaltungszustand, unterstützt durch Ergebnisse der begleitenden Voruntersuchungen. Sehr oft erfolgt dann eine Instandsetzung im Sinne einer reaktiven Instandhaltungsstrategie.

Deshalb sind eine genaue Ermittlung der Depassivierung der Bewehrung durch exakte Prüfungen und ein Prognosemodell besonders wichtig für eine kosteneffiziente Erhaltung. Das Einsparungspotential über die gesamte Lebensdauer eines Bauwerks ist enorm.

Die in diesem Beitrag gezeigte LA-ICP-MS-Methode (LA-ICP-MS: Laser Ablation Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry) ermöglicht bei vergleichbaren Kosten exaktere und aussagekräftigere Ergebnisse als mit der traditionellen Chloridbestimmung mittels Titration. Die Vorteile der neuen und der traditionellen Methode werden diskutiert und die Ergebnisse beider Methoden verglichen. Im Beitrag wird gezeigt, dass die traditionelle titrimetrische Methode oftmals zu hohen Abweichungen und zu systematischen Fehlern in den Ergebnissen führt. Mit der hier propagierten LA-ICP-MS-Methode ist es möglich, die Zuverlässigkeit der erhaltenen Ergebnisse signifikant zu verbessern. Die erstmals hohe Ortsauflösung der Chloridprofile ist einzigartig und zusammen mit der hohen Genauigkeit der Bestimmung von Chlorid bezogen auf den Zementgehalt ergeben sich noch nicht dagewesene Möglichkeiten für eine exakte Beurteilung und Prognose.

1 Einleitung

Viele der derzeit bestehenden Infrastrukturbawerke wie Brücken unterliegen einer hohen Belastung aus der Umwelt. Während der Winterzeit wird Streusalz für das Auftauen von Schnee und Eis auf der Fahrbahn verwendet. Dabei ist besonders der Unterbau, wie Widerlager und Säulen, dem Angriff der Chloride stark ausgesetzt. Darüber hinaus sind mehr als die Hälfte der Bauwerke in den 1970er oder 1980er Jahren gebaut worden. Bei diesen stehen nun größerer Instandsetzungen an, die ungefähr alle 20 Jahre notwendig sind. Voraussetzung für

eine erfolgreiche und nachhaltige Instandsetzung von Stahlbetonbauwerken ist die Kenntnis der Schadensmechanismen sowie ein sicheres Erkennen aller Schädigungseinflüsse.

Der erste Schritt ist das Bestimmen des Erhaltungszustandes anhand einer detaillierten visuellen Begutachtung der Bauteile sowie der Ergebnisse der durchgeführten, quasi-zerstörungsfreien Baustoffprüfungen. Die Kenntnis über den Zustand der Bauteile, respektive des Objektes, ist essentieller Bestandteil einer erfolgreichen und langanhaltend wirksamen Instandsetzung. Der Erhaltungszustand (Schä-

digung und Schadensgrad) kann indirekt auch (ohne Monitoring) anhand von visuellen und zerstörungsfreien Untersuchungsmethoden determiniert werden.

Die durch Chlorid induzierte Korrosion ist bei den betrachteten Bauteilen der dominierende Faktor der progressiv ablaufenden Degradation. Dabei ist die Bewehrung von Stahlbetonbauwerken unter normalen Umständen durch die hohe Alkalität des Betonporenwassers (pH-Werte von 12 bis 14) ausreichend vor Korrosion geschützt, da der im Beton eingebettete Stahl unter diesen Bedingungen eine Oxidschicht ausbildet, die diesen dann vor Korrosion schützt. Diese Passivierung des Stahls kann im Laufe der Zeit durch Umwelteinflüsse allerdings verloren gehen. Davon betroffen sind typischerweise Stützenfüße und Bauteile im Spritzwasserbereich [1]. Bei ausreichender Menge von Chloriden an der Bewehrungsoberfläche entsteht ein Bereich, der nicht mehr durch eine Oxidschicht geschützt ist. Diese Stelle bietet einen Angriffspunkt für Korrosion.

Der Schädigungsprozess bei der chloridinduzierten Bewehrungskorrosion kann in zwei Phasen unterteilt werden (Bild 1), wobei Rissbildung und Abplatzungen nicht immer auftreten müssen. Während der Einleitungsphase können von der Oberfläche in die Betondeckung eindringende, aggressive Substanzen wie Kohlendioxid und Chloride zum Verlust der Passivität des Stahls führen. Die Dauer dieser Phase ist abhängig von der Betonzusammensetzung, seiner Nachbehandlung, der Höhe der Betondeckung, Alter und Zustand. Daraus ergeben sich die Geschwindigkeiten des Eindringens der Chloride und des Voranschreitens der Karbonatisierungsfront, die ab einer gewissen Konzentration zum Verlust der Passivierung des Stahls führen. Die Depassivierung stellt eine Voraussetzung für die Korrosion des Bewehrungsstahls im Beton und das Ende der Einleitungsphase dar, siehe Bild 1. Mit zu-

nehmender Zufuhr von Chloriden depassivieren immer größere Flächenbereiche. Die einzelnen Korrosionsstellen wachsen zusammen, sodass es zu einer flächigen Korrosion kommt. Die sich bildenden Risse im Beton sind in der Volumenzunahme der Korrosionsprodukte gegenüber dem ursprünglichen Stahlvolumen begründet.

2 Tücken der Standard-Chlorid-Bestimmungsmethode

Derzeit ist die Standardmethode zur Bestimmung des Chloridgehaltes die titrimetrische Volhard-Methode, die in der europäischen Norm EN 14629:2007 [3] beschrieben ist. Dabei werden Betonproben durch Bohren von Betonkernen oder Bohrlochstaub in verschiedenen Tiefenebenen entnommen.

Die Titration ist ein exaktes Analyseverfahren. Das Problem besteht jedoch darin, dass die Proben zumeist keinen repräsentativen Chloridgehalt aufweisen, was einerseits zu hoher Streuung und andererseits zu falschen Ergebnissen führt. Dies resultiert bspw. von einer nicht repräsentativen Probe, die Zuschlagstoffe in einem höheren oder niedrigeren Gehalt als die Betonmasse enthalten kann. Bei der Titrationsanalyse wird der Chloridgehalt für die gesamte Probe bestimmt. Ist die Menge der Gesteinskörnung (angenommen, diese enthalten kein Chlorid) in der Probe höher als im repräsentativen Beton, wird ein niedrigerer Chloridgehalt bestimmt. Die Proben sind in der Regel sehr

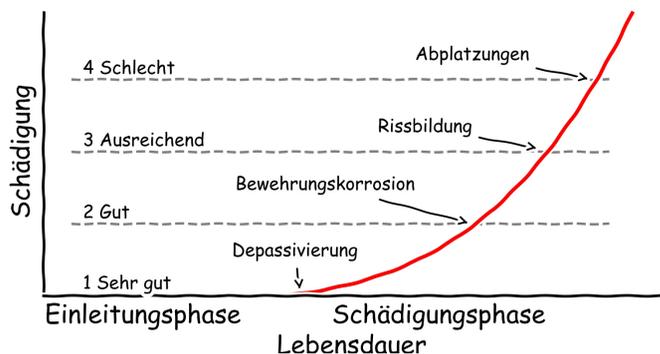


Bild 1: Zeitabhängige Entwicklung der Schädigung bei chloridinduzierter Bewehrungskorrosion

klein, sodass diese Abweichungen nahezu immer hoch sind. Ein zweiter Grund für eine hohe Streuung ist, dass der Zementgehalt für diese Analysen normalerweise nicht bekannt ist und ein konservativer Wert gewählt werden muss. Außerdem kann das Ergebnis fehlerhaft sein, da die Gesteinskörnungen Chloride enthalten können (siehe Bild 2, rechts) bzw. Bestandteile als Chloride interpretiert werden. Die Zuschlagstoffe sind in der Regel sehr dicht; das Chlorid in den Gesteinskörnungen ist nicht frei und trägt somit nicht zu einer Depassivierung bei. Im Inneren der Gesteinskörnungen können Chloridansammlungen auftreten, die während der Probenvorbereitung mit dem Bohrmehl abgeschlossen werden, sodass dieser Chloridgehalt mit dem freien Chlorid im Zementstein vermischt wird. Das Chlorid aus dem Inneren der Gesteinskörnungen würde nicht zur Korrosionsanfälligkeit beitragen und führt so zu einem fehlerhaften Chlorid-zu-Zement-Gehalt. Bei Zuschlägen kann es zudem vorkommen, dass einzelne Elemente fälschlicherweise als Chlorid interpretiert werden.

3 Neues Messverfahren LA-ICP-MS

Die Grundlage für eine genaue Vorhersage der Chloridanreicherung im Beton ist eine genaue Messung der Chloride in Bezug auf Örtlichkeit und Analysegenauigkeit der wesentlichen Elemente. Für das neue Analyseverfahren wurde besonderes Augenmerk gelegt auf:

- eine Unterscheidung zwischen Zuschlag und Zementstein,
- eine hohe Tiefenauflösung (derzeit 3 mm),
- eine hohe Analysegenauigkeit,
- eine hohe Anzahl von Messpunkten je Tiefenstufe (bis zu 18 Messpunkte), um die natürliche Streuung des Betons abbilden zu können,
- eine Quantifizierung als Chloridgehalt je Masse Zement, da dieser meist nicht bekannt ist, jedoch für die Beurteilung wesentlich ist.

Bei diesem neuartigen Ansatz wird eine selektive Quantifizierung von Chlorid in der Zementphase durchgeführt. Chloridhaltige Gesteinskörnungen werden von der Datenauswertung

ausgeschlossen, so dass eine sehr zuverlässige Bestimmung des Gehaltes an Chlorid in der Zementphase, kombiniert mit einer hohen Tiefenauflösung, erzielt werden kann. Zusätzlich wird der Chloridgehalt als ein Bruchteil des Zementgehaltes bestimmt – der wichtigste Parameter für die Depassivierung.

Die Methode wurde entwickelt, um gebohrte Betonkerne zu analysieren, die aus Strukturen durch Nassbohren entnommen wurden. Der Durchmesser des Kerns ist dabei ca. 50 mm und die Länge (also die Tiefe des Chloridprofils) ca. 60 mm. Die Kerne werden anschließend trocken in Hälften (hier sind besondere Regelungen erforderlich) geschnitten. Auf den Schnittflächen wird die LA-ICP-MS-Analyse entlang von Linien durchgeführt, die parallel zur äußeren Oberfläche verlaufen. Die Probenanalyse wird mit einem Laserstrahl mit 250 µm Durchmesser durchgeführt, was die Messung von Tiefenprofilen mit erhöhter Tiefenauflösung ermöglicht.

Jede oberflächenparallele Linie wird für die Auswertung in 18 Bereiche geteilt. Dann werden die Bereiche mit Zuschlägen ausgeschlossen und aus den gültigen Messungen werden der Mittelwert des Chlorid-zu-Zement-Gehaltes und seine Standardabweichung ermittelt. Dieser Mittelwert ergibt einen Punkt des Chlorid-zu-Zement-Profils (siehe Bild 2, links, blau umrandete Punkte und durchgezogene schwarze Linie). Eine detaillierte Beschreibung der LA-ICP-MS-Methode und ihrer Entwicklung sowie der Kalibrierung, Analyse und Verifizierung der erzielten Ergebnisse ist in [4] zu finden.

Von der anderen Hälfte des gebohrten Kernes wurde eine titrimetrische Volhard-Analyse gemäß EN 14629:2007 [3] durchgeführt (graue Balken). Man kann erkennen, dass der Unterschied zwischen der LA-ICP-MS und der Titration für diese Probe enorm hoch ist, nicht einmal der Trend ist im gesamten Verlauf gleich. Bei der LA-ICP-MS-Analyse wurde auch festgestellt, dass in den Zuschlägen Chlorid vorhanden war, was wahrscheinlich zu den enorm hohen Abweichungen der Ergebnisse mit Titration geführt hat, siehe Bild 2, rechts.

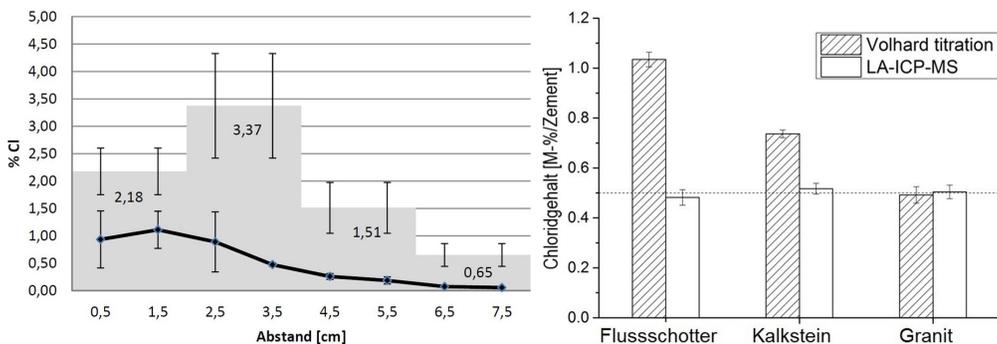


Bild 2: Vergleich von titrimetrischer Chloridbestimmung und LA-ICP-MS-Analyse (links) und Vergleich verschiedener Gesteinskörnungen in der Betonzusammensetzung und ihr Einfluss auf den Chloridgehalt mittels Titrimetrie und LA-ICP-MS (rechts)

Das rechte Diagramm in Bild 2 zeigt einen weiteren Vergleich. Hier wurden künstliche Proben mit gleichen Chloridgehalten jedoch unterschiedlichen Zuschlägen hergestellt und anschließend analysiert. Es zeigt sich, dass die Analyseergebnisse mit LA-ICP-MS keinen Einfluss des Zuschlages aufzeigen, wohingegen die Methode der Titration durchaus Anteile von Zuschlägen als Chlorid interpretiert hat. Kaum Abweichungen gab es hier bei Zuschlägen mit Quarz, jedoch hohe Abweichungen bei Flussskies (Details siehe [5]).

Daher ist es auf der Grundlage der gezeigten Ergebnisse wenig zielführend, mit der Titration bzw. eigentlich der Bohrmehlentnahme ein Vorhersagemodell zu entwickeln.

4 Experimentelle In-situ-Untersuchungen

4.1 Vergleiche mit der Normmethode

Die beiden Methoden wurden im Rahmen einer Untersuchungskampagne an einer Überführung im österreichischen Autobahnnetz der ASFiNAG an einem ca. 40 Jahre alten Beton durchgeführt. Mehr als 44 Bohrkern für die LA-ICP-MS-Analyse und Bohrmehlproben für die konventionelle Analyse wurden unmittelbar nebeneinander aus der Struktur entnommen. Die Entnahme der Proben erfolgte in drei Höhen (H1 = 0,75 m, H2 = 1,75 m und H3 = 2,75 m) über Straßenniveau und in einer Entfernung von etwa 1,25 m neben dem Pannestreifen.

Diese Ebenen entsprechen der Kontaktzone (H1), der Spritzwasserzone (H2) und der Sprühnebelzone (H3) [1]. Die Probenahme und die Analyse wurden wie zuvor beschrieben durchgeführt. Die Auflösung der LA-ICP-MS-Methode wurde mit drei Werten pro Zentimeter und die Titrationsanalyse bei einer typischen Auflösung von einem Wert alle zwei Zentimeter durchgeführt. Alle Profile wurden bis zu einer Tiefe von 8 cm analysiert. Die Diagramme in Bild 3 zeigen die Ergebnisse der beiden Methoden mit ihrem unteren und oberen Interquartilbereich (IQR $\pm 25\%$) für jeden Horizont. Aufgrund der stark unterschiedlichen Tiefenauflösung der beiden Analysemethoden wurden in den Abbildungen Balken und Linien verwendet. Die Mittelwerte der titrimetrischen Analyse sind oberflächennah in allen Ebenen wesentlich höher als die LA-ICP-MS-Ergebnisse. Die LA-ICP-MS und die titrimetrischen Ergebnisse zeigen, dass die Mittelwerte, aber auch die Streuung bei beiden Methoden mit zunehmendem Abstand von der Oberfläche abnehmen. Die höchsten Konzentrationen treten in der Kontaktzone und die niedrigste in der Spritzzone auf.

In Strukturen dieser Baujahre ist die Bewehrung im Allgemeinen in einer Tiefe von etwa 2,5 cm zu erwarten. Normen spezifizieren einen Chloridgehalt von mehr als 1 Massen-% Zement als kritisch (ÖNORM B4706:2015 [6]). Die Grafiken in Bild 3 zeigen, dass die Ergebnisse der Titrationsmethode diesen Schwellenwert im Kontaktbereich und im Spritzbereich überschreiten, die LA-ICP-MS-Mittelwerte hingegen nur in der

Kontaktzone. Die Mittelwerte der LA-ICP-MS-Methode zeigen in der Spritz- und Sprühzone die Maxima nicht auf der äußeren Betonoberfläche, sondern in einer Tiefe von 0,67 cm. Es treten auch gelegentliche lokale Maxima in tieferen Bereichen auf.

Die Mechanismen der Eindringprozesse werden in den ersten ein bis vier Zentimetern durch Konvektion (Salzwasser dringt ein) und in größeren Tiefen durch Diffusion beschrieben. Es wird angenommen, dass abwechselnd eine Beaufschlagung mit Salzwasser, die zur Chloridanreicherung führt, und eine Beaufschlagung mit Regenwasser, die zur Auswaschung von Chlorid führt, diese Maxima im Inneren erzeugen [7].

4.2 Jahresganglinie

Bei dieser Untersuchung wurden nahezu wöchentlich über ein ganzes Jahr Proben aus dem Bauwerk entnommen. Insgesamt waren dies 144 Kerne aus vier verschiedenen Horizonten (Niveau über Straßenoberkante). Der Jahreszyklus des Chloridgehaltes ist nahe der Oberfläche in Bild 4 und auf Bewehrungsebene (in 3,6 cm Tiefe) in Bild 5 dargestellt. Der Verlauf des Chloridgehaltes ist mit den Daten aus dem Winterdienst (Auf-tausalzeinsatz, graue Balken) erweitert.

Die Chloridprofile über ein ganzes Jahr wurden in Bild 6 jahreszeitlich über die Tiefe gemittelt.

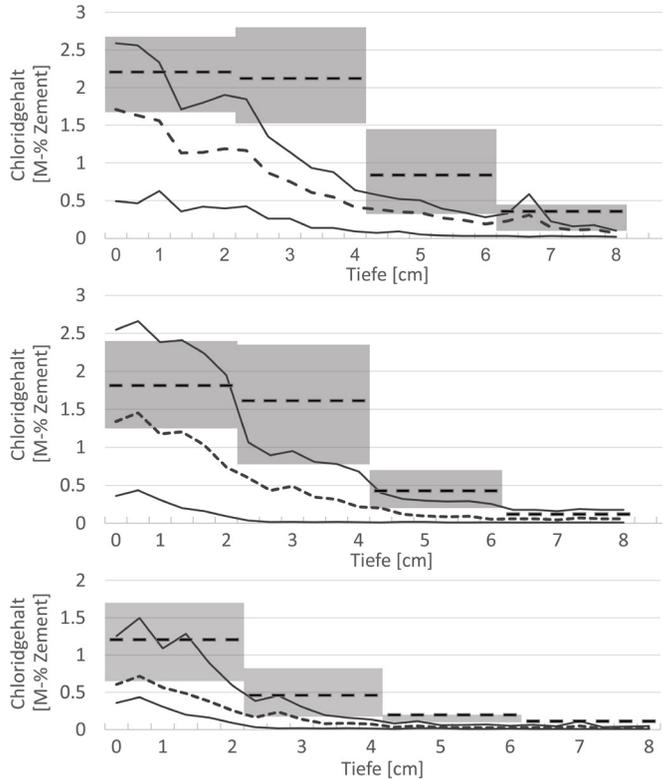


Bild 3: Ergebnisse der Bestimmung des Chloridgehaltes mit der LA-ICP-MS-Methode (durchgezogene Linien) und der titrimetrischen Methode (graue Balken); oben: in der Kontaktzone (H1 = 0,75 m), Mitte: in der Spritzwasserzone (H2 = 1,75 m), unten: in der Sprühzone (H3 = 2,75 m)

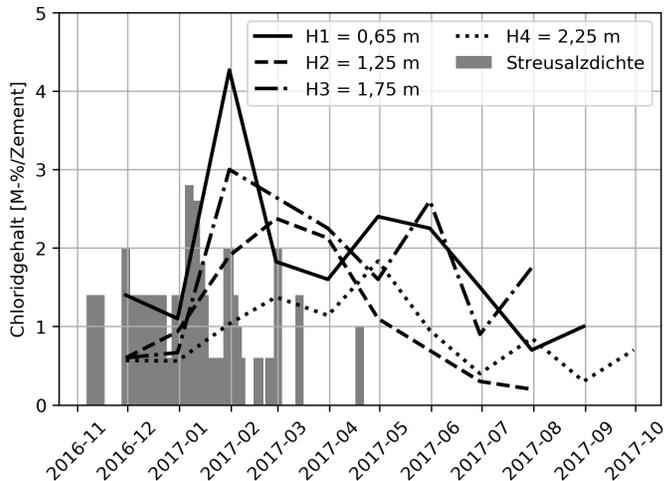


Bild 4: Monatliche Mittelwerte der Chloridkonzentration in [M.-%/Zement] nahe der Oberfläche (0,33 cm) über den Jahreszyklus in vier verschiedenen Höhen

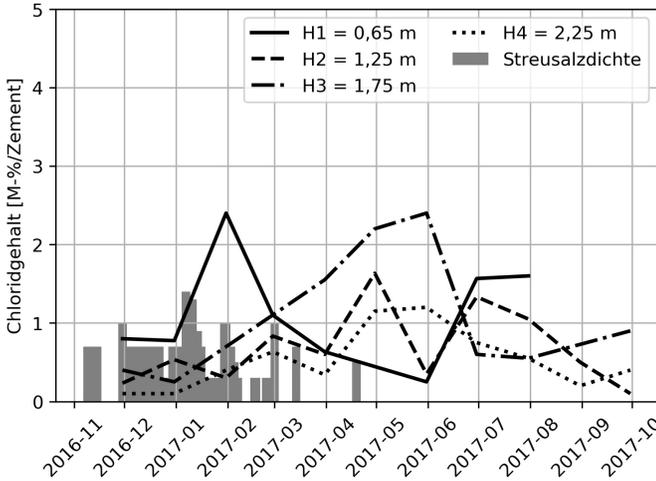


Bild 5: Monatliche Mittelwerte der Chloridkonzentration in [M-%/Bindemittel] auf Bewehrungsstabhöhe (3,63 cm) über den Jahreszyklus in vier verschiedenen Höhen

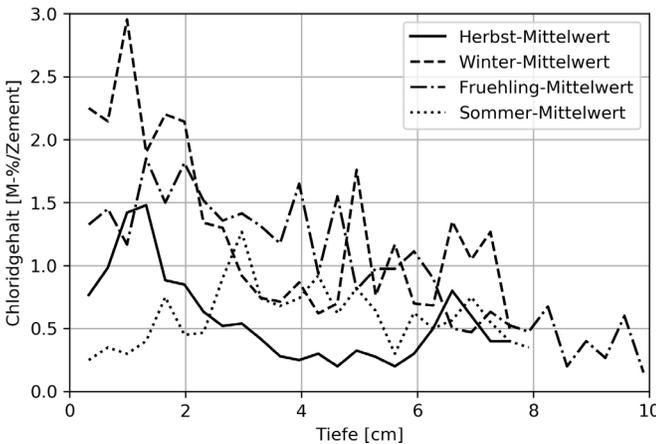


Bild 6: Über die Jahreszeiten gemittelt Chloridprofil auf Höhe H2 = 1,25 m

Bild 7 zeigt die Entwicklung des Chloridprofils über das betrachtete Jahr, unterschieden in Winterdienst (von 1. November bis 15. April) und Sommerbetrieb im restlichen Jahreszeitraum.

Die aus den Chloridprofilen gewonnenen Daten zeigen eine enorme Streuung des Chloridgehaltes im Jahresverlauf, sogar nach Mittelung der Horizonte und Zeitspannen. Die Ergebnisse zeigen zudem, dass der Chloridgehalt in der Betondeckung schnell ansteigt, wenn ein Bauwerk Streusalz ausgesetzt ist, insbesondere bei vor-

herigem direktem oder Spritzwasserkontakt. Wie in den Abbildungen zu sehen ist, migriert die hohe Streusalzmenge während der Wintersaison in die Betonmasse. Tendenziell ist der Eintrag der Chloride höher, je näher die Untersuchungsstelle dem Straßenniveau liegt. Die Grafiken zeigen aber auch, dass im Jahresverlauf massive Tiefenveränderungen der Maxima erfolgen. Es zeigt sich, dass der Grenzwert (1 % Cl je Masse Zement) im Jahresverlauf unter- und überschritten wird, in einigen Horizonten sogar mehrmals. Die Kurven zeigen eindeutig, dass auch in tieferen Bereichen, also etwa in Bewehrungsebene und darüber, der Zeitpunkt der Probennahme entscheidend für eine Beurteilung der Korrosionsgefahr aufgrund Chloridkontamination ist [8]. Es laufen hier noch weitere Untersuchungen, um diese Effekte genauer zu bestimmen.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Die Bestimmung der Chloridkonzentration in der Zementphase von Beton stellt ein wichtiges Kriterium zur Fest-

legung von Sanierungszeitpunkten sowie über das Ausmaß von Sanierungsmaßnahmen für Bauelemente dar.

Die etablierte Normmethode zur Bestimmung der Chloridkonzentration in der Zementphase von Beton weist einige Nachteile auf. Einerseits gestaltet sich die Probenvorbereitung aufwendig und zeitintensiv, andererseits sind die so erhaltenen Ergebnisse nur in unbefriedigender Ortsauflösung und in äußerst unbefriedigender Genauigkeit verfügbar. Zudem wird der

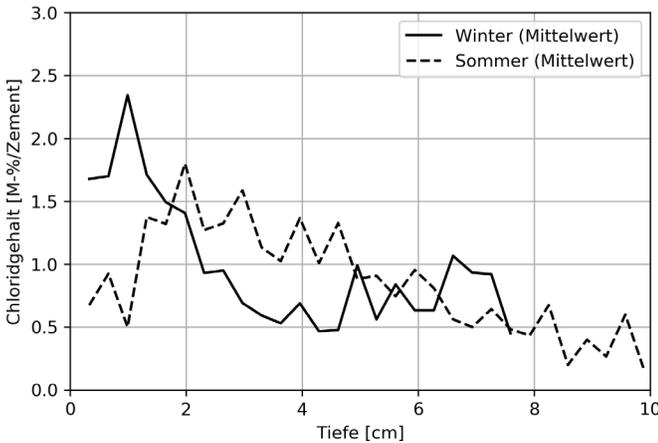


Bild 7: Chloridprofil kondensiert im Winter- und Sommerbetrieb auf Höhe H2 = 1,25 m

meist unbekanntem Zementgehalt nur pauschal berücksichtigt. Die Ortsauflösung ist durch die Probenahme im Zentimetermaßstab limitiert und die Konzentration von Chlorid in der Zementphase kann nur durch Multiplikation der ermittelten Gesamtchloridkonzentration mit einem Faktor bei Kenntnis des Zementgehaltes erfolgen.

Diese Vorgehensweise kann bestenfalls als Schätzung zur Beurteilung des Sanierungsbedarfs betrachtet werden. Im Zuge der Arbeit konnte darüber hinaus festgestellt werden, dass die über Titration erhaltenen Ergebnisse nicht nur hohe Abweichungen aufweisen, sondern sogar falsch sein können, da auch im löslichen Zuschlag von Beton ein nicht zu vernachlässigender Anteil an Chlorid vorhanden sein kann, der durch den chemischen Aufschluss freigesetzt wird und beim Titrationsverfahren mitbestimmt wird. Durch die Umrechnung auf die Zementphase wird in weiterer Folge somit ein relevanter systematischer Fehler verursacht.

Die Ortsauflösung bei LA-ICP-MS kann mit steigendem Zeitaufwand für die Analyse beliebig verbessert werden und wird nur durch den Durchmesser des Laserstrahls limitiert. Für eine Analysendauer von circa einer Stunde pro Bohrkern kann die Auflösung um den Faktor 3 gegenüber der Normmethode verbessert werden. Zudem besteht jeder Wert aus 18 ober-

flächenparallelen Einzelmessungen, wovon ca. 50 % in der Zementphase zu liegen kommen. Der Messwert einer Tiefenstufe kann somit durch einen abgesicherten Mittelwert und eine Standardabweichung angegeben werden.

Die selektive Messung bzw. Auswertung von Chlorid und Zement ausschließlich im Zementstein von Beton bedeutet einen entscheidenden Vorteil im Vergleich zur Normmethode. Die Umrechnung der durch die Titration erhaltenen

Ergebnisse würde nur dann richtige Ergebnisse liefern, wenn zumindest diese vier Voraussetzungen erfüllt wären:

1. Der Zementanteil im Beton ist bekannt – in der Praxis ist dies kaum der Fall oder nur in unbefriedigender Genauigkeit.
2. Der im Beton vorhandene Zuschlag ist – im Inneren – chloridfrei. Durch Aufschluss wird der im Zuschlag gebundene und für die Problematik der Depassivierung des Bewehrungsstahls irrelevante Anteil an Chlorid mitquantifiziert und verfälscht das Ergebnis bei Umrechnung auf die Zementphase stark.
3. Die entnommene Probe stellt einen repräsentativen Anteil des Betons dar (das Verhältnis Zementstein/Zuschlag der Probe muss dem des Betons entsprechen, also ein repräsentatives Volumen sein) – dies ist ebenso meist nicht der Fall ist.
4. Komponenten der Zuschläge werden bei der Titration nicht fälschlich als Chlorid interpretiert.

Alle genannten Voraussetzungen sind für eine genaue Bestimmung des Chloridgehaltes in der Zementphase mittels LA-ICP-MS irrelevant, da die den Ergebnissen zugrundeliegenden Informationen selektiv und mit einer hohen Analyseanzahl aus der Zementphase gewonnen werden. Vergleiche mit der Normmethode zeigen bei sehr hohen Chloridgehalten noch einigermä-

ßen gute Übereinstimmungen. Die großen Unterschiede im Bereich des kritischen Chloridgehaltes können durch unterschiedlich starke Einflüsse der vorher genannten vier Voraussetzungen beim Normverfahren erklärt werden. Die mit dem Normverfahren verursachten Abweichungen und systematischen Fehler können zu einerseits einem Überbefund führen und somit Sanierungsmaßnahmen einleiten, deren Ausmaß die tatsächlich notwendigen überschreiten, und andererseits die Struktur unbeabsichtigt und in manchen Fällen auch sicherheitsrelevant weit über das geplante bzw. gewünschte Ausmaß schädigen. Durch die selektive Quantifizierung in der Zementphase mittels LA-ICP-MS wird hingegen nur der interessierende Anteil mit hoher Analysezahl, Genauigkeit und Zementanteil berücksichtigt. Die Praxistauglichkeit der Methode wurde mit Realproben belegt und die so erhaltenen Ergebnisse weisen einen höheren Vertrauensgehalt bei deutlich reduziertem Analyseaufwand auf. Eine zuverlässige Bestimmung des Chloridgehaltes ist somit möglich, für die Praxis aufbereitet und wurde auch schon an zahlreichen Bauwerken erprobt.

Alle Chloridprofile, die mit der LA-ICP-MS-Methode untersucht wurden, werden zusammen mit Objektdaten, Zustandsdaten, Exposition sowie anderen Messgrößen für die Dauerhaftigkeit in einer Datenbank gesichert. Es werden dabei nicht nur Daten von Forschungsprojekten gespeichert, sondern auch Zustandsbeurteilungen von „echten“ Bauwerken. Die Auswertung dieses Datenschatzes erlaubt eine zielführende Entwicklung von Prognosemodellen und anderen Verbesserungsmaßnahmen für die Neuerichtung dauerhaften Strukturen und eine auf den Lebenszyklus orientierte, kostengünstige Erhaltung. Die Kosten und CO₂-Einsparungen, die dadurch möglich werden, sind enorm.

Literatur

- [1] Eichinger-Vill, E.; Kollegger, J.; Aigner, F.; Ramberger, G.: Überwachung, Prüfung, Bewertung und Beurteilung von Brücken. In: Mehlhorn, G. (Hrsg.): Handbuch Brücken, 2. erw. u. bearb. Aufl., Berlin Heidelberg: Springer, 2010, S. 1009–1068
- [2] Tuutti, K.: Corrosion of steel in concrete. Diss., Swedish Cement and Concrete Research Institute, Stockholm, 1982
- [3] ÖNORM EN 14629:2007-06: Produkte und Systeme für den Schutz und die Instandsetzung von Betontragwerken – Prüfverfahren – Bestimmung des Chloridgehaltes von Festbeton.
- [4] Burtscher, S. L.; Limbeck, A.: Ortsaufgelöste Bestimmung von Chlorid in Beton mittels LA ICPMS – Methodenentwicklung, Kalibrierung, Validierung, Vergleich mit Normmethode. Bericht, Technische Versuchs- und Forschungsanstalt GmbH für Asfinag Service GmbH, 2016
- [5] Bonta, M.; Eitzenberger, A.; Burtscher, S. L.; Limbeck, A.: Quantification of chloride in concrete samples using LA-ICP-MS. Cement and Concrete Research 86 (2016), S. 78–84 – DOI: 10.1016/j.cemconres.2016.05.002
- [6] ÖNORM B4706:2015-07: Instandsetzung von Betonbauwerken – Nationale Festlegungen für Produkte und Systeme für den Schutz und die Instandsetzung von Betonbauwerken gemäß ÖNORM EN 1504.
- [7] Binder, F.; Burtscher, S. L.; Limbeck, A.: Forecast Improvement of Chloride Profiles in Road Structures using LA-ICP-MS. In: Bakker, J.; Frangopol, D. M.; van Breugel, K. (Hrsg.): Proc. of the 5th Int. Symp. on Life-Cycle Civil Engineering (IALCCE 2016), 16.–19.10.2016 in Delft (Niederlande), 2016, S. 834–838
- [8] Binder, F.; Burtscher, S. L.; Limbeck, A.: Study on the time variant alteration of chloride profiles for prediction purpose. In: Caspeele, R.; Taerwe, L.; Frangopol, D. M. (Hrsg.): Life Cycle Analysis and Assessment in Civil Engineering: Towards an Integrated Vision – Proc. of the 6th Int. Symp. on Life-Cycle Civil Engineering (IALCCE 2018), 28.–31.10.2018 in Ghent (Belgien), 2018, S. 331–338

Bildquellen

- Bild 1: Fritz Binder, nach [2]
 Bild 2 links: Stefan L. Burtscher, aus [5]
 Bild 2 rechts: Maximilian Bonta, aus [4]
 Bild 3: Fritz Binder, aus [7]
 Bilder 4–7: Fritz Binder, aus [8]

Schriftenreihe Konstruktiver Ingenieurbau Dresden Heft 55

Das 11. Symposium „Experimentelle Untersuchungen von Baukonstruktionen“ (SEUB) fand am 08. März 2021 als digitale Veranstaltung an der TU Dresden statt. Im vorliegenden Buch sind die schriftlichen Beiträge zusammengestellt.

In der Keynote Lecture wurde über Versuche an einem Brückenbauwerk sowohl in situ als auch im Prüflabor berichtet – eine Verifizierung, die nur selten vorkommt. Danach spannte sich der thematische Bogen über die Tragfähigkeit von Gewölbebrücken, berührungslose Messverfahren im Praxistest, über Monitoring und schwingungsbasierte Messungen an Bauwerken hin zu faseroptischen Messsystemen und ihren Einsatzmöglichkeiten bei der Risserfassung. In weiteren Beiträgen wurde eine neue Methode zur verbesserten Bestimmung des Chloridgehalts im Beton vorgestellt, über ein Verfahren zur Spanndrahtbruchdetektion mittels Schallemission und über das Potential des kathodischen Korrosionsschutzes berichtet. Mit einem Bericht über eine erfolgreiche Probelastung einer mit Carbonbeton verstärkten Plattenbrücke endete die Tagung.

Das 12. SEUB ist für März 2023 geplant.

Der vorliegende Tagungsband ist als digitale Version Open Access auf der Homepage des Instituts für Massivbau der TU Dresden abrufbar.

ISSN: 1613-6934

ISBN: 978-3-86780-665-7