



Abb. 1/2: Durch korrodierten Bewehrungsstahl kommt es zu einer Volumenvergrößerung und damit zu Betonabplatzungen oberhalb des Bewehrungsstahls.

Nicht zu vergleichen

Chloridgehalte in Stahlbetonbauteilen bestimmen: Im Rahmen einer Sanierungsplanung von Betonbauwerken wie Parkhäusern, Brücken und Tunneln ist es von besonderer Bedeutung, die Risiken einer chloridinduzierten Stahlkorrosion zu bewerten. Trotzdem entscheiden sich Planungsbüros und ausschreibende Stellen aus Kosten- und Zeitgründen häufig dafür, nur die wasserlöslichen Chloridgehalte zu bestimmen. Die Orientierungswerte aus der Instandsetzungsrichtlinie gelten aber nur für säurelösliche Chloridgehalte. Eine Methode, die in der Regel deutlich niedriger ausfallenden wasserlöslichen Chloridgehalte verlässlich umzurechnen, existiert nicht. Sinnvoller ist es daher, die säurelöslichen Chloridgehalte mit der Potenzialfeldmessung zu bestimmen, um gezielt solche Stellen zu finden, an denen Korrosionsprozesse zu erkennen sind.

Dr. Karl-Uwe Voß

Stahlbewehrungen sind im alkalischen Zementsteinmilieu des Betons gegen Korrosion geschützt. Denn bei pH-Werten > 10 bildet sich eine für Sauerstoff und Wasser nahezu undurchlässige Passivierungsschicht auf der Oberfläche des Bewehrungsstahls aus.

Die Passivierung der Bewehrung kann durch veränderte Bedingungen in ihrem Umfeld aufgehoben werden, zum Beispiel durch die Veränderung des pH-Werts infolge der Carbonatisierung des Betons oder durch die Einwirkung von Chloriden, die etwa durch Tausalz eingetragen werden.

Gelangen noch Wasser und Sauerstoff an die Bewehrung, „rostet“ der Stahl, wodurch es in der Folge zu einer Volumenvergrößerung und damit zu Betonabplatzungen oberhalb des Bewehrungsstahls kommt (Abb. 1/2).

Während es sich bei der carbonatisierungsinduzierten Stahlkorrosion um ein flächig auftretendes Phänomen handelt, läuft die chloridinduzierte Stahlkorrosion, die sogenannte Lochfraßkorrosion, häufig lokal begrenzt ab (Abb. 3–5). Sie entwickelt sich nur dann in relevanter Geschwindigkeit, wenn der kritische korrosionsauslösende Chloridgehalt auf Höhe des Bewehrungsstahls

überschritten wird und die weiteren Voraussetzungen für die Stahlkorrosion gegeben sind, insbesondere den Zutritt von Feuchtigkeit und Sauerstoff.

Proben müssen für das Bauteil repräsentativ sein

Um die Gehalte der in den Beton eingedrungenen Chloride zu bestimmen, sind Proben aus Bohrmehl oder Bohrkernscheiben in unterschiedlichen Tiefen von der Betonoberfläche aus zu entnehmen. Dabei ist von entscheidender Bedeutung, dass die Analysproben für das zu beurteilende Bauteil repräsentativ sind.



Abb. 3-5: Die durch Chlorid ausgelöste Lochfraßkorrosion ist oft lokal begrenzt.

Weiterhin sind die Anwendungsgrenzen der jeweiligen Probenahmeverfahren im Rahmen der Probenahme zu beachten, zum Beispiel die Anzahl der Teilproben zum Herstellen einer Mischprobe, das Aufmahlen der Proben vor der Durchführung der Untersuchungen und die Entnahmetiefen [1, 2].

Neben den verschiedenen Probenahmeverfahren beeinflussen auch die Analyseverfahren wesentlich die Genauigkeit der Untersuchungsergebnisse. Normativ sind nur das Verfahren nach Volhard und die potenziometrische Titration zulässig, um die Chloridgehalte im Beton zu bestimmen. Hierbei wird der Beton mit Salpetersäure vollständig aufgeschlossen [3].

Im Gegensatz zu den oben erwähnten Verfahren kommen in der Praxis nicht selten Schnellprüfverfahren zur Anwendung, zum Beispiel der Nachweis mittels UV-Spektroskopie oder Ionenchromatografie. Mit diesen Schnellprüfverfahren werden nicht die Gesamtchloridgehalte, sondern nur die wasserlöslichen Chloridgehalte bestimmt. Diese Methoden werden wegen der geringeren Prüfkosten und der deutlich größeren Prüfgeschwindigkeit häufig in Verbindung mit dem Verfahren der Bohrmehlentnahme bei Parkhäusern und Tunnelbauwerken eingesetzt (Abb. 6).

Leider besitzen die ausschreibenden Stellen im Regelfall keine ausreichenden Kenntnisse darüber, wie die so gewonnenen Ergebnisse zu interpretieren sind und welchen Einschränkungen die Bewertbarkeit der ermittelten Chloridgehalte unterliegt. Dies zeigt sich in Ausschreibungstexten, in denen die Verfahren zur Vorbereitung der Proben in der Regel nicht genau beschrieben werden.



Abb. 6: Für einige Schnellprüfverfahren wird Bohrmehl aus dem Bauteil entnommen.

Gerade bei der Bestimmung der wasserlöslichen Chloridgehalte wirken sich die verwendeten Verfahren der Probenvorbereitung (Aufmahlen, Wassermenge und Kontaktzeit mit dem Wasser) aber erheblich auf das Prüfergebnis aus.

Beim einfachsten und schnellsten Vorbereitungsverfahren werden die Bohrmehlproben ohne weiteres Aufmahlen in einer Spritze mit dem Analysenwasser in Kontakt gebracht und die resultierende Prüflösung nach kurzer Kontaktzeit von häufig unter einer Minute zum Messen verwendet. Auch das Verhältnis von der Prüfgut- zur Wassermenge ist bei diesem Verfahren nicht definiert.

Die Wiederfindungsrate der Chloride, also der mit diesem Verfahren nachweisbare Anteil der enthaltenen Chloridgehalte, ist hierbei zum einen gering und schwankt zum anderen stark, sodass die tatsächlich vorliegenden Chloridgehalte bei diesem Verfahren auf Basis der ermittelten Untersuchungsergebnisse in der Regel deutlich unterschätzt werden.

Etwas bessere Ergebnisse werden erzielt, wenn das Bohrmehl vor der Untersuchung aufgemahlen wird, da der wasserlösliche Anteil in diesem Fall ansteigt.

Tabelle 1: Zusammenhang zwischen dem Vorbereitungsverfahren und den Wiederfindungsraten wasserlöslicher Chloride

	Chloridgehalte [M.-%]				
	Potenziometrische Titration	Ionenchromatograph		Abweichung [%]	
		wässriger Auszug	Verfahren		
6-19/1298/14-S1.1	0,4213	0,4052	24 h Schütteln	-3,8	-12,2
6-19/1298/14-W2.1	0,775	0,3288		-12,9	
6-19/1298/14-S1.2	0,2094	0,2173		3,8	
6-19/1298/14-W2.2	0,1689	0,1356		-19,7	
6-19/1298/14-W2.3	0,0747	0,0550		-26,4	
6-19/1298/14-S1.3	0,0355	0,0305		-14,1	
6-19/1101/14-1.1	0,2087	0,1434	24 h Schütteln	-31,3	-26,9
6-19/1101/14-2.8	0,1831	0,1417		-22,6	
6-19/1104/14-1.1-0,5-1,5	0,1003	0,0706	24 h Schütteln	-29,6	-43,3
6-19/1104/14-1.1-1,5-2,5	0,0455	0,0264		-42,0	
6-19/1104/14-1.1-2,5-3,5	0,0197	0,0106		-46,2	
6-19/1104/14-1.2-0,5-1,5	0,079	0,0507		-35,8	
6-19/1104/14-1.2-1,5-2,5	0,0356	0,0188		-47,2	
6-19/1104/14-1.2-2,5-3,5	0,0160	0,0072		-55,0	
6-19/1104/14-1.3-0,5-1,5	0,8380	0,0776		-90,7	
6-19/1104/14-1.3-1,5-2,5	0,0260	0,0148		-43,1	
6-19/1104/14-1.3-2,5-3,5	0,0127	0,0059		-53,5	
6-19/1104/14-1.4-0,5-1,5	0,1517	0,1098		-27,6	
6-19/1104/14-1.4-1,5-2,5	0,1063	0,0694		-34,7	
6-19/1104/14-1.4-2,5-3,5	0,0302	0,0189		-37,4	
6-19/1104/14-1.5-0,5-1,5	0,1132	0,0829		-26,8	
6-19/1104/14-1.5-1,5-2,5	0,0525	0,0339		-35,4	
6-19/1104/14-1.5-2,5-3,5	0,0245	0,0135		-44,9	

Allerdings sind die Wiederfindungsraten auch bei diesem Verfahren deutlich geringer als beim sauren Aufschluss. Die genauesten Ergebnisse erhält man mit Schnellprüfverfahren, wenn das Bohrmehl aufgemahlen wird und die Probe mindestens 24 Stunden im Verhältnis 1:10 mit Wasser geschüttelt wird. Allerdings werden auch bei diesem Verfahren normalerweise geringere Chloridgehalte als beim säurelöslichen Aufschluss ermittelt. Ein Planer, der kein konkretes Verfahren zur Probenvorbereitung im LV-Text definiert, muss damit rechnen, dass die Prüfstelle das einfachste und kostengünstigste, aber auch das ungenaueste Verfahren bestellungskonform anwendet.

Instandsetzungsrichtlinie nennt Orientierungswerte für Chloridgehalt
Bei den in einschlägigen Technischen Regelwerken wie der Instandsetzungsrichtlinie genannten Richtwerten handelt es sich um langjährige Erfahrungswerte, die auf Basis der säurelöslichen (und nicht der wasserlöslichen) Chloridgehalte festgelegt wurden [3]. Danach dürfen im Beton salpetersäurelösliche Chloridgehalte in einer Größenordnung von 0,03 Masse-Prozent bezogen auf den Beton enthalten sein. Auch bei diesem Richtwert handelt es sich nur um einen groben Orientierungswert. Bei der sachgerechten Bewertung müssten die ermittelten Chloridgehalte auf die C₃A-Anteile des Zementsteins bezogen werden.

Da die Instandsetzungsrichtlinie von einem sehr geringen Zementgehalt ausgeht, liegt diese Bewertung auf der sehr sicheren Seite. Zur genaueren Bewertung der Chloridgehalte von Bauwerksproben ist in der Instandsetzungsrichtlinie aus diesem Grunde zusätzlich ein zementbezogener Richtwert von 0,5 Masse-Prozent genannt.

Wiederfindungsrate wasserlöslicher Chloridgehalte ist deutlich geringer
Die Wiederfindungsrate der Chloride liegt bei der Prüfung der wasserlöslichen Anteile im Regelfall deutlich unterhalb der Wiederfindungsrate für die säurelöslichen Anteile. Demnach lassen sich wasserlösliche Chloridgehalte nicht ohne weiteres mit den aufgeführten Richtwerten vergleichen.

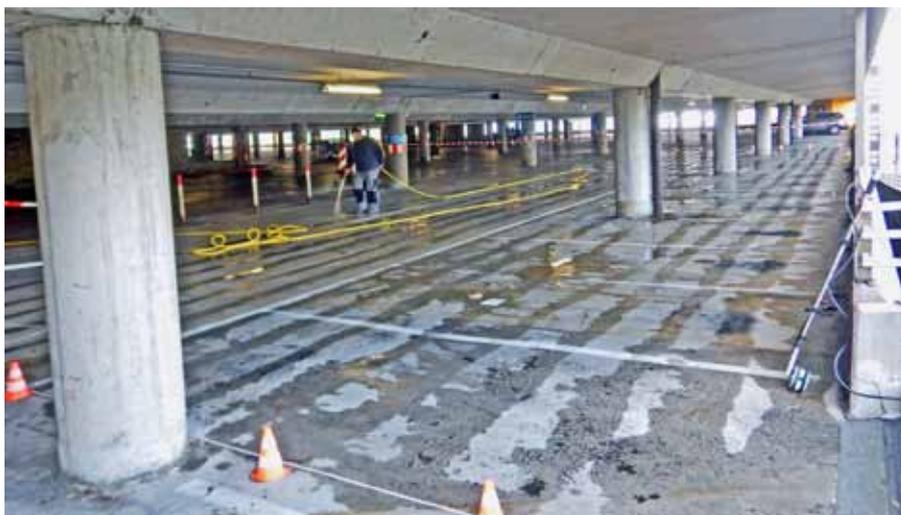


Abb. 7/8: Mit einer Potenzialfeldmessung können gezielt diejenigen Stellen für die Probenahme lokalisiert werden, an denen aktuell eine Stahlkorrosion abläuft.

Einheitliche Faktoren zur Umrechnung von wasserlöslichen in säurelösliche Chloridgehalte sind nicht bekannt, sodass eine sachgerechte Bewertung von wasserlöslichen Chloridgehalten nur sehr eingeschränkt möglich ist. Um einheitliche Umrechnungsfaktoren zwischen wasser- und säurelöslichen Chloridgehalten zu ermitteln, hat die MPVA Neuwied orientierende Vergleichsuntersuchungen durchgeführt. Dabei wurde der wässrige Auszug mit der Ionenchromatografie untersucht, der salpetersaure Aufschluss durch potenziometrische Titration (Tabelle 1).

Die Ergebnisse aus der rechten Spalte von Tabelle 1 veranschaulichen, dass mit der ionenchromatografischen Bestimmung der wasserlöslichen Chloride erwartungsgemäß

deutlich geringere Chloridgehalte als nach dem Säureaufschluss und der Bestimmung der säurelöslichen Chloride gefunden wurden. Die Wiederfindungsrate der wasserlöslichen Chloride variierte dabei stark. Es wurde aber kein einheitlicher Zusammenhang zwischen den Vorbereitungsverfahren und den Wiederfindungsraten vorgefunden.

Potenzialfeldmessung vorschalten

Aus Sicht der Sanierungsplanung erscheint es daher deutlich sinnvoller, anstelle einer großen Zahl wasserlöslicher Chloridgehalte eine geringere Menge säurelöslicher Chloridgehalte zu untersuchen, dafür aber eine sogenannte Potenzialfeldmessung vorzuschalten (Abb. 7/8).

Mit einer solchen zerstörungsarmen Untersuchung können Teilflächen mit aktuell ablaufenden Korrosionsströmen lokalisiert werden, um so gezielt Stellen für die Entnahme der Chloridproben festzulegen. Anhand der hierbei erhaltenen Ergebnisse kann eine sachgerechte Prüfplanung ausgearbeitet werden.

Die Kombination der Potenzialfeldmessung mit der Bestimmung einer deutlich geringeren Prüfmenge an säurelöslichen Chloridgehalten liefert nicht nur deutlich mehr Informationen, sondern verringert gerade bei großen Flächen wie in Parkhäusern und bei Brücken nicht selten sogar die Prüfkosten deutlich. Darüber hinaus lassen sich auf Basis einer sachgerechten Prüfplanung die Sanierungsbereiche viel sicherer festlegen – inklusive der abgeleiteten Abtragstiefe des Betons. Dadurch sinken nicht nur die Prüfkosten, vielmehr fallen auch die Sanierungsaufwendungen häufig geringer aus.

Darüber hinaus bietet die Potenzialfeldmessung den Vorteil, dass auf Basis ihrer Ergebnisse Aussagen zu den Sanierungshöhen möglich sind, das heißt bis zu welcher Höhe der Beton zum Beispiel an Stützen abgetragen werden muss. Die erforderliche Abtragstiefe muss weiterhin auf Basis der nachgeschalteten Chloridbeprobungen festgelegt werden. Ein typisches Ergebnis für die Untersuchung einer Tiefgarage mit der Potenzialfeldmessung ist in Abb. 9 exemplarisch dargestellt.

Wie bei fast allen modernen Prüfverfahren ist aber auch bei diesem Verfahren zu beachten, dass die Untersuchungsmethodik Schwachstellen und Potenzial für Fehlbeurteilungen enthält. Diese sind in [1] und [2] detailliert dargestellt. ■

Autor

Dr. rer. nat. Karl-Uwe Voß

Geschäftsführer und Institutsleiter der Materialprüfungs- und Versuchsanstalt Neuwied, von der IHK Koblenz als Sachverständiger für Analyse zementgebundener Baustoffe öffentlich bestellt und vereidigt Neuwied

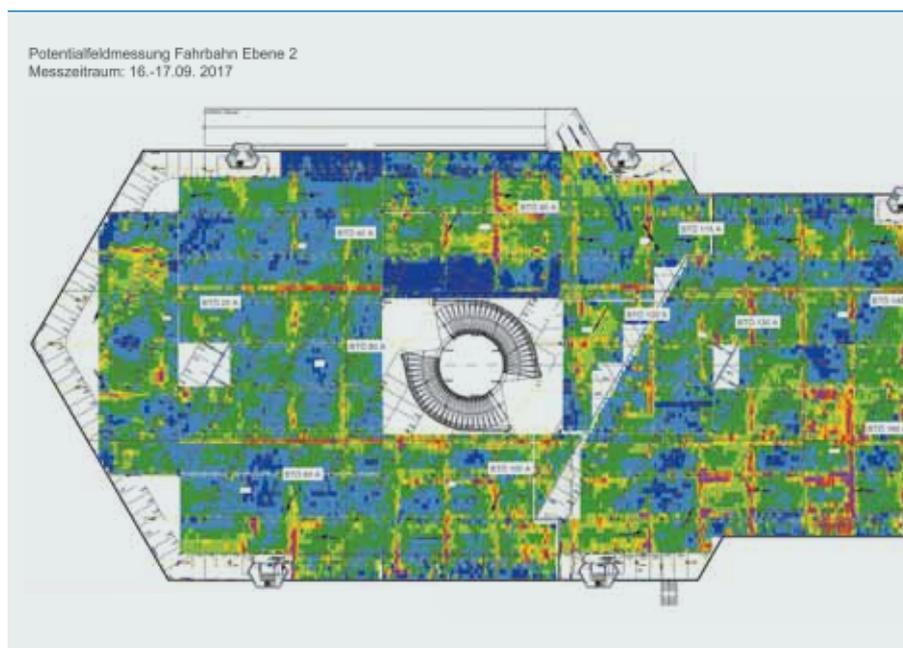


Abb. 9: Ergebnisse der Potenzialfeldmessung auf der Fahrbahn eines Parkhauses: Sie zeigen an, wo die Stahlkorrosion aktuell abläuft und bis zu welcher Höhe der Altbeton abgetragen werden muss. Die aktuell ablaufenden Korrosionsströme liegen hier vor allem im Bereich der Unterzüge (rote und pinkfarbene Teilflächen).

Literatur

- [1] Voß, Dr. K.-U.: Anwendungsgrenzen der Bestandsuntersuchungen vor einer sachgerechten Instandsetzungsplanung – Teil 1, in: Beton 12/2012
- [2] Voß, Dr. K.-U.: Anwendungsgrenzen der Bestandsuntersuchungen vor einer sachgerechten Instandsetzungsplanung – Teil 2, in: Beton 1-2/2013, S. 18–23
- [3] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (Hrsg.): DAfStb-Richtlinie – Schutz und Instandsetzung von Betonbauteilen (Instandsetzungs-Richtlinie), Ausgabe 2001-10
- [4] [4] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Arbeitskreis Prüfverfahren – Chlorideindringtiefe (Hrsg.): Heft 401/1 Anleitung zur Bestimmung des Chloridgehaltes von Beton, 1989
- [5] [5] Breit, W.: Kritischer korrosionsauslösender Chloridgehalt für Stahl – Sachstand – Teil 1, in: Beton 7/1998, S. 442–449
- [6] Breit, W.: Kritischer korrosionsauslösender Chloridgehalt für Stahl – Sachstand – Teil 2, in: Beton 8/1998
- [7] Schöppel, K.: Aussagekraft von Chloridwerten aus Betonbauwerken hinsichtlich der Korrosionsgefährdung, in: Beton- und Stahlbetonbau 11/2010, S. 703–713
- [8] [8] Schöppel, K.; Dorner, H.; Letsch, R.: Nachweis freier Chlorionen auf Betonoberflächen mit dem UV-Verfahren, in: Betonwerk + BFT Fertigteil-Technik 11/1988
- [9] Breit, W.: Kritischer Chloridgehalt – Untersuchungen an Stahl in chloridhaltigen alkalischen Lösungen, in: Materials and Corrosion, 49, 1998, S. 539–550
- [10] Taffe, A; Wilsch, G; Schaurich, D: Zuverlässige Bestimmung von Chloridgehalten bei der Instandsetzung tausalzgeschädigter Bauwerke, in: 4. Kolloquium Verkehrsbauten – Schwerpunkt Parkhäuser, 2./3. Februar 2010, Tagungsband. Technische Akademie Esslingen TAE, 2010, S. 405–412
- [11] Sodeikat, Ch.: Auffinden von Bewehrungskorrosion mit Hilfe der Potentialfeldmessung, in: Tagungsband 1. Kolloquium Verkehrsbauten – Schwerpunkt Parkhäuser an der Technischen Akademie Esslingen 27./28.01.2004, S. S. 637–648