

Vermeidung chloridinduzierter Korrosion in Tunnelinnenschalen aus Stahlbeton

FA 15.603

Forschungsstelle: MFPA Leipzig GmbH

Bearbeiter: Schmidt, J. / Rudolph, M. /
Orgass, M. / Schneider, J. /
Lorenz, H. / Reichel, S.

Auftraggeber: Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach

Abschluss: April 2020

1 Aufgabenstellung

Im Rahmen des Forschungsvorhabens sollten auf der Basis bekannter Zusammenhänge sowie ergänzend durchzuführender Untersuchungen vor Ort und im Labor Grundlagen zur Abschätzung der Chlorideindringung in Tunnelinnenschalenbeton geschaffen werden. Im Ergebnis sollte ein Konzept erarbeitet werden, mit dessen Hilfe zielgerichtet Untersuchungen zum Eindringen von Chloridionen in Beton vorgenommen werden können.

Hierfür standen Fragebögen zu Chloridbelastungen in Straßentunneln zur Verfügung. Diese wurden im Rahmen einer im Jahre 2013 durch das Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) und die BAST initiierten Abfrage von den zuständigen Brückenreferenten der Länder beantwortet. Gemäß den Angaben des BMVI (BMVI, 2018) waren zu Beginn des Jahres 2016 über 260 Straßentunnel im Zuge von Bundesfernstraßen in Betrieb. Der gesamte Straßentunnelbestand, einschließlich Land-, Kreis- und Stadtstraßen, lag bei etwa 400.

Im Zuge der Länderabfrage wurden für jedes Bauwerk die folgenden Informationen abgefragt:

- Tunnelname,
- Tunnellänge,
- Tunnelquerschnitt,
- Höhe des Tunnels ü. NN,
- Ausrichtung des Tunnelportals (Himmelsrichtung),
- Straßentyp,
- Jahr der Inbetriebnahme,
- Art der Tunnelwandoberfläche,
- Betonrezeptur der Innenschale, gegebenenfalls getrennt für Portalblock und Innenbereich,
- Neigung der Fahrbahn an Stellen mit hoher Chloridbelastung,
- Höhenprofil an Stellen mit hoher Chloridbelastung,
- durchschnittlicher Chloridgehalt im Beton in Abhängigkeit von der Tiefe,
- betroffene Gesamtfläche,

- Zustand der Innenschale mit Blick auf vorhandene Bewehrungskorrosion,
- Angaben zum Streumittleinsatz: Wird auch im Tunnel gestreut? Welches Streumittel wird verwendet? Ca. Anzahl der Tage mit Streumittleinsatz/Jahr.

Die zur Verfügung stehenden Daten aus den Rückmeldungen wurden zunächst zusammengefasst und, sofern möglich, systematisiert. Anschließend wurde am Beispiel Bayern versucht, unter Berücksichtigung der zusätzlich zu den Fragebögen vorliegenden Untersuchungsergebnisse und der Bauwerksbücher, Zusammenhänge zwischen der Chloridbelastung und quantitativen Parametern herzustellen.

Im Ergebnis der 2013 initiierten Länderabfrage gingen Rückmeldungen zu insgesamt 53 Bauwerken ein, was etwa 13 % des gesamten Straßentunnelbestands entspricht. Von diesen 53 Tunneln waren 22 Tunnel nachweislich mit Chloriden belastet. Daraus kann im Umkehrschluss jedoch nicht geschlussfolgert werden, dass die restlichen Bauwerke unbelastet sind. Für diese Tunnel lagen lediglich keine Untersuchungsergebnisse vor. In den Länderabfragen wurde dies zumeist mit fehlenden Schäden begründet.

2 Ergebnis der Länderabfrage

Als ein wesentliches Ergebnis der Länderabfrage ist zuallererst festzustellen, dass in allen untersuchten Tunneln auch Chloride nachgewiesen wurden. Das Verkehrsaufkommen hat tendenziell einen Einfluss auf die Höhe der Chloridbelastung. Es bestehen jedoch Abhängigkeiten zum Streumittleinsatz. Als Streumittel kommen überwiegend Natriumchlorid (NaCl) als Salz und/oder Sole zum Einsatz. Andere Auftaumittel sind Calciumchlorid (CaCl₂), Magnesiumchlorid (MgCl₂) und Kaliumchlorid (KCl). Welches Auftaumittel verwendet wird, ist dabei von verschiedenen Randbedingungen (zum Beispiel Temperatur) abhängig.

Der Straßentyp (Bundesstraße, Autobahn) hatte keinen direkten Einfluss auf die Chloridbelastung. Auch die Bauweise (bergmännisch oder offene Bauweise) hat scheinbar keinen Einfluss auf die Chloridbelastung. Allerdings hat die mit der Bauweise verknüpfte Profilform einen Einfluss auf die Chloridverteilung im Tunnel. So konnte bei den Tunneln in offener Bauweise beobachtet werden, dass über die Höhe nur eine geringe Abnahme des Chloridgehalts auftrat. Zudem waren zwischen den Chloridproben an Außenwand (Fahrspur) und Innenwand (Überholspur) zum Teil kaum Unterschiede zu verzeichnen.

Ein qualitativer Einfluss des Bauwerksalters auf die Chloridbelastung (belastet/unbelastet) ließ sich nicht feststellen, da keine Negativergebnisse (Untersuchungen, bei denen in den Proben keine Chloride nachgewiesen wurden) vorliegen. Auf die Höhe des Chloridgehalts hatte das Bauwerksalter zunächst ebenfalls keinen Einfluss. Allerdings konnte bei den ausführlicher betrachteten Tunneln in Bayern beobachtet werden, dass der

Chloridgehalt in den größeren Tiefen (40-60 mm) über die Jahre tendenziell zunimmt. Das entspricht wegen der zeitabhängigen Transportprozesse auch der Erwartung.

In den untersuchten Tunneln wurden über die gesamte Bauwerkslänge Chloride nachgewiesen. Auch in Tunnelmitte wurden dabei teilweise Konzentrationen in ähnlicher Höhe wie im Einfahrtsbereich festgestellt. Die höchsten Konzentrationen traten zumeist im ersten Tunnel Drittel auf. Dabei ist zu berücksichtigen, dass in diesem Bereich die Dichte der Untersuchungsstellen meist am größten war.

3 Experimentelle Untersuchungen

Zum Studium von Materialeigenschaften, die für das Eindringen und die Ausbreitung von Chloriden maßgebend sind, wurden eigene Laborprüfkörper hergestellt. Dazu werden vier Betonblöcke unter Verwendung zweier unterschiedlicher Zemente hergestellt. Verwendet wurden typische Tunnelinnenschalenbetonrezepturen für die offene und geschlossene Bauweise gemäß ZTV-ING. Durch Variation der w/z-Werte wurden je Zementart zwei Probekörper mit unterschiedlichen Porositätseigenschaften betoniert. Anhand von entnommenen Bohrkernen wurden mit drei Beanspruchungszeiträumen tiefenabhängige Chloridgehalte und der Chloridmigrationswiderstand sowie die Chloriddiffusion ermittelt.

Außerdem wurden Untersuchungen an drei bayrischen Tunnelbauwerken durchgeführt. Aus den Tunnelbauwerken wurden Bauwerke ausgewählt, die sich in Merkmalen unterscheiden, die für chloridinduzierte Korrosion von Bedeutung sind. Wesentliche Unterscheidungsmerkmale waren dabei das Bauwerksalter, die Bauweise, die verwendete Zementart und gegebenenfalls Zusatzstoffe. Zur Untersuchung wurden grundsätzlich in jedem Tunnel mindestens zwei Blöcke ausgewählt. Dabei sollte ein Block möglichst in der Nähe der Tunneleinfahrt liegen, der zweite zu untersuchende Block in Fahrtrichtung mindestens 250 m Richtung Tunnelmitte. Weiterhin sollte die Lage von Beprobungsstellen früherer Untersuchungen berücksichtigt werden, sodass gegebenenfalls Vergleiche möglich sind. Weitere Einschränkungen bei der Auswahl ergaben sich durch Lärmschutzverkleidungen, Installationen und Ausrüstungen, Notrufrischen und dergleichen auf der Tunnelwand. Bei der Auswahl der zu untersuchenden Tunnel wurden außerdem Bauwerke ausgespart, die grundhaft instandgesetzt oder mit Anlagen zum kathodischen Korrosionsschutz ausgerüstet waren. Es wurden die Autobahntunnel Prüfening und Pfaffenstein sowie der Tunnel Farchant im Zuge der Bundesstraße B 2 in Bayern untersucht.

Da die chloridinduzierte Korrosion lange Zeit ohne äußerlich bemerkbare Schäden abläuft – was in der Länderabfrage ein oft genannter Grund für bisher nicht stattgefundene Untersuchungen war – fanden nach der obligatorischen visuellen Prüfung und Beurteilung der Tunnelinnenschalenoberfläche (Untersuchung auf Risse, sichtbare Schäden, Beschichtung, ...) zunächst zerstörungsfreie Untersuchungen statt. In diesem Zusammen-

hang wurden an den Untersuchungsstellen die Korrosionspotentiale in verschiedenen Lagen gemessen und die Betondeckung zerstörungsfrei als Linienscan bestimmt. Letztere Untersuchung steht dabei zwar nicht im direkten Zusammenhang mit dem Eindringen von Chloriden, ist jedoch für die Bewertung der Ergebnisse der Potenzialmessungen von Bedeutung.

Des Weiteren wurden die elektrische Leitfähigkeit des Betons und die kapillare Wasseraufnahme rasterförmig ermittelt. Beide Faktoren stehen in direktem Zusammenhang mit dem Eindringen von Chloridionen in den Beton beziehungsweise mit der Stahlkorrosion.

Einen wesentlichen Faktor beim Eindringen von Chloriden stellt der Beton beziehungsweise dessen Zusammensetzung dar. Zur Bestimmung der Qualität des Überdeckungsbetons wurde aus diesem Grunde die Luftpermeabilität der Tunnel-Oberfläche an mehreren Stellen gemessen.

Die Ergebnisse der überprüften alternativen Prüfverfahren zur Abschätzung des Chlorideintrags korrelieren nicht ausreichend mit den Ergebnissen der direkten Bestimmung des Chloridgehalts, wobei zu berücksichtigen ist, dass keine wesentlichen Korrosionserscheinungen als Referenz feststellbar waren. In erster Linie kommt die Aufnahme von Chloridprofilen, verbunden mit der Messung der Betondeckung infrage. Mit der Potenzialfeldmessung lassen sich Bereiche mit aktiver Korrosion lokalisieren.

Die Proben zur Messung des Chloridgehalts im Beton wurden zweckmäßig als Bohrmehl entnommen. Es erfolgte eine tiefenabhängige Abstufung bis 60 mm, wobei der Tiefenbereich 0 bis 5 mm nicht für die weiterführende Modellierung des Chlorideintrags angesetzt wurde. Die untere Entnahmestelle lag bei 25 cm über Fahrbahn/Notgehweg. Weitere Entnahmehöhen erfolgten in 1,50 m Höhe und in 2,50 m Höhe. Die Untersuchung der Proben geschah nach den Vorgaben des DAFStb-Hefts 401.

4 Literaturstudie

Parallel zu den experimentellen Untersuchungen erfolgte für die Prognose des zu erwartenden Chlorideintrags eine Literaturstudie. Die Literaturstudie belegte, dass eine Vielzahl von Modellen existiert, die überwiegend auf der Annahme basieren, dass Diffusionsprozesse den wesentlichen Mechanismus des Chloridtransports in das Bauteilinnere darstellen. Zur Prognostizierung des zeitlichen Verlaufs des Chlorideintrags und der darauf aufbauenden Beurteilung der Dauerhaftigkeit des Bauwerks wurden zahlreiche Modelle und Berechnungsverfahren entwickelt. Der Forschungsbericht bietet einen Überblick zu den für Tunnelbauwerke bedeutsamsten Modellen. Als Grundlage für die Modellierung der Chlorid-Eindringvorgänge wurde ein semi-probabilistischer Ansatz gewählt. Das Ziel der hier ausgeführten Berechnungen bestand nicht in der Dauerhaftigkeitsbemessung neu zu errichtender Bauteile, sondern in der Prognose der weiteren Entwicklung des Chloridgehalts in einem bestehenden Bauwerk, für das Chloridprofile aus Bauwerksuntersuchungen

vorliegen. Die Berechnungen basieren auf dem Ingenieurmodell aus International Federation for Structural Concrete, 2006. Das notwendige Kurvenfitting zur realitätsnahen Prognose wird in einer Tabellenkalkulation durch wiederholten Aufruf des MS excel solvers realisiert. Dabei werden in Formeln die Parameter $C_{s,\Delta x}$ und $D_{app}(t)$ variiert, bis die Abweichung vom ermittelten Chloridprofil als Summe der Fehlerquadrate ein Minimum erreicht. Zur Verringerung der erforderlichen Rechenzeit werden für beide Werte plausible Grenzen vorgegeben. Das Kurvenfitting ist nur erfolgreich im Sinne brauchbarer Ergebnisse, wenn das zugrunde liegende Chloridprofil prinzipiell dem Verlauf einer Diffusionskurve entspricht. Die oberflächennahen Abschnitte des Chloridprofils (Konvektionszone) müssen, wenn sie nicht dem 2. Fickschen Gesetz folgen, aus den zum Fitting verwendeten Daten entfernt werden. Mit der Verwendung der beschriebenen Zusammenhänge und unter Nutzung der konkret an einem Bauwerk ermittelten Chloridprofile ist die Prognose der zukünftigen Chloridverteilung von den vorliegenden Analysewerten der Bauwerksuntersuchungen abhängig. Da diese je nach Entnahmestelle zum Teil erheblich streuen, ist es deshalb nach Meinung der Autoren nicht zweckmäßig, aus der Chloridverteilung einer einzelnen Messstelle eine auf ebendiese Messstelle bezogene Prognose abzuleiten. Zweckmäßiger ist es, nach bauwerksbezogenen Kriterien gemittelte Tiefenprofile des Chloridgehalts zu verwenden und für den einbezogenen Bereich eine einheitliche Prognose abzuleiten.

5 Folgerungen für die Praxis

Im Ergebnis der semi-probabilistischen Modellierung der Chlorid-Eindringvorgänge konnte eine praktikable Prognose für einen wählbaren Zeitraum erstellt werden und mit den auf Basis der experimentell ermittelten Chloridprofile validiert werden. Auf Grundlage der Prognose können erneute Untersuchungen und gegebenenfalls Instandsetzungsmaßnahmen geplant werden. Zur Vereinheitlichung ist anzustreben, einen Datenbestand zu schaffen, bei dem für alle Tunnelbauwerke mit Stahlbetoninnenschale einheitliche Chloridprofile, im Sinne der Entnahmeart und -position sowie der Nachweisart der Chloridione, vorliegen. Für die Probenahme und Prüfung bei Chloriduntersuchungen sollte eine Handlungsanweisung in die ZTV-ING aufgenommen werden.

Weiterhin sollten bauwerksspezifische Daten (Zementsorte, Verkehrsbelastung, Streutage, geografische Höhenlage, Alter des Bauwerks) erfasst und bewertet werden.

Sofern in der Tiefenlage der Bewehrung der Chloridgehalt annähernd den kritischen Wert von 0,5 M.-% Chlorid, bezogen auf den Bindemittelgehalt des Betons, erreicht, wird flächige Messung der Korrosionspotenziale in den betreffenden Blöcken empfohlen. An auffälligen Stellen, insbesondere im Bereich hoher Potenzialgradienten, sollte Bewehrung freigelegt und ihr Korrosionszustand beurteilt werden. Eine einmalige Wiederholung der Chloridbestimmung ist zur Überprüfung der Prognosen zur Chloridmigration in größeren Abständen zu empfehlen. Als

Zeitintervall werden 6 bis 12 Jahre, in Verbindung mit den Hauptprüfungen, empfohlen.

Mit den Erkenntnissen des Forschungsvorhabens beziehungsweise mit der darin beschriebenen Herangehensweise ist es möglich, Bestands-Tunnelbauwerk hinsichtlich der Gefahr einer chloridinduzierten Korrosion zu charakterisieren und eine Prognose für den tiefen- und zeitabhängigen Chloridgehalt im Beton für die geplante (Rest-)Nutzungsdauer abzuschätzen.