

Zusammenfassung

Die häufigste Ursache für Instandsetzungsarbeiten an Bauwerken der Verkehrsinfrastruktur ist die chloridinduzierte Korrosion der Bewehrung. Der Schädigungsprozess wird in zwei relativ klar unterscheidbare Phasen unterteilt. Deshalb umfassen Modelle für Prognosen der Dauerhaftigkeit meist auch zwei Teilmodelle: ein erstes für die Initiierungsphase, während der die Chloride in den Beton eingetragen werden, ein zweites für die daran anschließende Korrosionsphase. Viele Modelle für den Chlorideintrag basieren auf reiner Diffusion und setzen damit einen mehr oder weniger homogenen Prozess voraus. Schwierigkeiten entstehen bei der Beschreibung und der Prognose des Chlorideintrags unter der wechselnden Beanspruchung durch Spritzwasser. Unter derartigen Verhältnissen, die oft bei Bauwerken der Verkehrsinfrastruktur vorherrschen, verläuft der Eintrag von Chloriden in den Beton nicht homogen. Die vorliegende Arbeit hatte primär zum Ziel, detaillierte Kenntnisse zu erhalten über die bei der Wasser- und Chloridaufnahme ablaufenden physikalischen Prozesse. Insbesondere sollten die festgestellten einzelnen Ereignisse, während denen innert kurzer Zeit eine grosse Wasser- und Chloridaufnahme erfolgt, charakterisiert und definiert werden und im Weiteren sollte ein Vorschlag für die rechnerische Modellierung des Chlorideintrags unter Spritzwasserbeanspruchung erarbeitet werden.

Die Zielsetzungen wurden durch die Kombination eines umfangreichen Feldversuchs mit verschiedenen Laboruntersuchungen erreicht. Im Feldversuch wurde einerseits das Verhalten verschiedener Betone verglichen und andererseits eine breite Datenbasis für die Analyse der Beanspruchungsseite unter einer natürlichen Spritzwasserbelastung beschafft. Der Einsatz eines Online-Monitorings ermöglichte die detaillierte Erfassung und das Studium der Vorgänge in situ. Von der Analyse des Wasserhaushalts im Beton konnte auf den Aufbau von Chloridprofilen in solchen Expositionen geschlossen und ein entsprechendes Berechnungsmodell entwickelt werden.

Unter wechselnden Spritzwasserverhältnissen prägen Einzelereignisse den Wasserhaushalt. Die wichtigsten Transportmechanismen von Wasser während diesen Ereignissen sind Kapillartransport und Verdunstung, die gleichzeitig ablaufen. Wegen der Verdunstung ist der Wassereintrag infolge Kapillartransport vor Ort kleiner als während eines Aufsaugversuchs im Labor. Unter bestimmten klimatischen Verhältnissen wird die Verdunstung aber so gering, dass innerhalb von kurzen Zeitabschnitten nahezu Versuchsbedingungen vorliegen und die Wasseraufnahme vor Ort mit ähnlichen Geschwindigkeiten erfolgt wie im Labor. Dies ist der Fall bei einer Kombination von sehr hohen Luftfeuchtigkeiten mit tiefen Temperaturen. Klimatisch bedingt sind demnach grosse Wassereinträge nur in den Wintermonaten zu erwarten. Ab März bis etwa November sind die Wasseraufnahmen auf eine Oberflächenschicht von

5 bis 10 mm beschränkt, und der Beton trocknet von aussen nach innen langsam aus. Bei günstigen klimatischen Voraussetzungen für eine Wasseraufnahme wird die aufgenommene Wassermenge durch die Qualität des Betons und dessen momentanen Feuchtigkeitszustand bestimmt.

Auf Grund ihrer Auswirkungen auf den Feuchtigkeitszustand im Beton wurden grosse, mittlere und kleine Ereignisse definiert. Als Kriterium zur Charakterisierung dieser Ereignisse wurde die Tiefe des Wassereintrags gewählt. Diese ist von der Exposition und der Betonqualität unabhängig. Während nach mittleren Ereignissen nach 2 bis 4 Wochen der Ausgangszustand bezüglich der Feuchtigkeit im Beton wieder erreicht wird, haben Grossereignisse eine Langzeitwirkung von mehreren Monaten. Das bedeutet, dass Grossereignisse nicht nur beim Schadstoffeintrag eine wichtige Rolle spielen, sondern dass sie auch einen wesentlichen Einfluss auf die Korrosionsgeschwindigkeit haben.

Die Art des Wassereintrags prägt auch den Eintrag von Chloriden, der während der Ereignisse in den Wintermonaten über den Kapillartransport erfolgt. Der Chlorideintrag erfolgt damit sehr schnell innerhalb kurzer Zeitabschnitte von wenigen Tagen. Die entsprechenden Chloridmengen und deren Eintragstiefe wurden für die verschiedenen Ereignisse abgeschätzt. Wie die Wassermengen sind sie von der Betonqualität abhängig. Für die Bildung von Chloridprofilen konnte damit ein einfaches Modell vorgeschlagen werden, das die verschiedenen Transportmechanismen berücksichtigt: Während der Wintermonate werden Chloride durch Kapillartransport in den Oberflächenbereich eingetragen, dort angereichert und evtl. in grössere Tiefen weitertransportiert. Während des ganzen Jahrs werden sie, den jeweils vorhandenen Konzentrationsgradienten entsprechend, durch Diffusion nach innen, evtl. auch nach aussen umverteilt. Der Beitrag des Kapillartransports wird auf Grund des Aufsaugverhaltens des Betons und der Exposition bestimmt, und für die Berechnung der Umverteilung werden der im Labor bestimmte Chloridmigrationskoeffizient und eine entsprechende Lösung für die Diffusionsgleichung verwendet. Mit dem Modell werden die wesentlichsten Mechanismen auf den Chlorideintrag unter wechselnder Spritzwasserbeanspruchung erfasst und verschiedene Einflüsse auf diese Mechanismen können auf einfache Art integriert werden. Es ermöglicht damit verbesserte Prognosen.

Die angewandte Kombination von Messungen vor Ort mit verschiedenen Laboruntersuchungen hat sich bewährt. Sie ermöglichte die Analyse des Wasserhaushalts von Beton unter natürlicher Spritzwasserbelastung und die Beschaffung der Datenbasis für die Modellierung.

Bei ähnlichem kapillar füllbarem Porenvolumen nimmt ein Beton mit gröberen Poren schneller Wasser auf und trocknet auch schneller wieder aus als ein feinporiger Beton. Die Nachhaltigkeit von Ereignissen ist damit in Betonen mit gröberen Poren kleiner und eine nächste Wasseraufnahme ist schneller wieder möglich. Das bedeutet, dass bei gleicher Exposition insgesamt mehr Wasser und Chloride aufgenommen werden. Dies war beim Beton mit $w/z = 0.50$, beim Flugasche- und beim Hüttensandbeton der Fall. Der Beton mit Silikastaub nahm im Verhältnis zu seinem kapillar füllbaren Porenvolumen eher kleinere Wassermengen auf. Die positive Auswirkung eines tiefen w/z -Werts im Hinblick auf den Wasser- und Chlorideintrag konnte klar nachgewiesen werden. In allen Betonen war der Anteil gebundener Chloride hoch und lag bis zu einem Gesamtchloridgehalt von rund 2 M% bezogen auf den Zementgehalt zwischen 63 und 85 %. In Betonen mit Zusatzstoffen sind wegen des höheren elektrischen Widerstands vor allem während der Austrocknungsphase in den Sommermonaten markant kleinere Korrosionsgeschwindigkeiten zu erwarten. Bei sehr feuchtem oder nassem Beton in den Wintermonaten sind die Unterschiede geringer.