

Quantifizierung und Prognose der Betonschädigung beim Säureangriff

Jesko Gerlach¹, Markus Mahlbacher¹, Corinna Rozanski¹, Michael Haist¹, Ludger Lohaus¹

¹*Institut für Baustoffe, Leibniz Universität Hannover*

KURZFASSUNG:

Performance-basierte Konzepte zur Sicherstellung der Dauerhaftigkeit sehen vor, die Eignung eines Betons anhand von anerkannten Prüfverfahren und Leistungskriterien nachzuweisen. Bei säurebeanspruchten Bauteilen ist jedoch zu beachten, dass diese am Ende ihrer Nutzungsdauer reduzierte Abmessungen aufweisen können. Demnach ist die alleinige Betrachtung von baustofflichen Leistungskriterien i. d. R. nicht ausreichend und bedingt einen bauteilbezogenen Nachweis. Dies erfordert ein entsprechendes Prognosemodell, das die zeitabhängige Entwicklung der Schädigung beschreibt. Vor diesem Hintergrund wird ein Diffusions-Abtrags-Modell vorgestellt, das durch die Berücksichtigung des Abtrags der geschädigten Betonrandzone eine realitätsnähere Prognose als derzeit gängige Modelle ermöglicht. Darüber hinaus werden unterschiedliche Methoden zur Erfassung der Schädigung betrachtet, aus denen erforderliche Modellparameter abgeleitet werden können.

Keywords: Chemischer Betonangriff, Dauerhaftigkeitsbemessung, Diffusions-Abtrags-Modell, Computertomographie, Magnetresonanztomographie

ABSTRACT:

Performance-based durability design of concrete structures is usually based on performance tests with predefined performance criteria. However, considering acid attack on concrete structures, it must be kept in mind that reduced structural dimensions have to be assumed at the end of the service life due to the formation of a corroded surface layer with low mechanical strength. Consequently, the exclusive consideration of material resistance is not sufficient and the specification of a performance limit has to be in conjunction with required structural dimensions. Therefore, it becomes necessary to consider the degradation of the structural component. For this purpose, a newly developed diffusion-erosion-model is presented. Furthermore, several methods for the determination of acid-induced concrete degradation are considered. A crucial requirement for the derivation of model's parameters.

Keywords: Chemical attack, Durability design, Diffusion-erosion-model, Computer tomograph, Nuclear magnetic resonance tomography

1 EINLEITUNG

In vielen Anwendungsbereichen des Beton- und Stahlbetonbaus können Bauteile und Bauwerke eine chemische Beanspruchung erfahren. Dabei kann grundsätzlich zwischen einem lösenden und einem treibenden Betonangriff unterschieden werden. Ein lösender Angriff kann einerseits durch saure Wässer bzw. Säuren hervorgerufen werden, andererseits durch bestimmte austauschfähige Salze. Ursache für einen treibenden Angriff sind in der Regel sulfat- oder magnesiumhaltige Wässer.

Die Sicherstellung der Dauerhaftigkeit chemisch beanspruchter Beton- und Stahlbetonbauteile erfolgt nach dem derzeitigen Normenwerk nach DIN EN 206-1:2001 und DIN 1045-2:2008 deskriptiv. Auf der Basis von Erfahrungswerten und standardisierten Angriffs- und Randbedingungen werden für praxiserprobte Betone Mindestanforderungen an die Zusammensetzung, an die Herstellung, den Einbau und die Nachbehandlung definiert.

Neben diesem deskriptiven Konzept gewinnen leistungsbezogene bzw. performance-basierte Konzepte zunehmend an Bedeutung, wobei diese aus den Grenzen und Nachteilen des derzeitigen deskriptiven Konzepts resultieren. Als nachteilig werden nach Beushausen et al. (2016) und Gehlen et al. (2011) insbesondere folgende Aspekte bewertet:

- mangelnde Transparenz bzw. Unkenntnis über das erzielbare Dauerhaftigkeits- bzw. Zuverlässigkeitsniveau
- keine Berücksichtigung der Leistungsfähigkeit unterschiedlicher Ausgangsstoffe (Zement, Zusatzstoffe etc.)
- starre Nutzungsdauer
- Hindernis für die Anwendung neuartiger Betone und Bauweisen
- unwirtschaftlich

Performance-basierte Konzepte sehen vor, die Eignung eines Betons nicht anhand der Zusammensetzung und der Ausgangsstoffe zu beurteilen, sondern diese u. a. auf der Grundlage von anerkannten und erprobten Prüfungen und Leistungskriterien nachzuweisen. Bei der Festlegung von Leistungskriterien ist jedoch zu beachten, dass durch Säuren beanspruchte Bauteile am Ende ihrer planmäßigen Nutzungsdauer eine gegenüber den ursprünglich geforderten und ausgeführten Bauteildimensionen reduzierte Abmessungen aufweisen. Demnach ist eine alleinige Betrachtung von Leistungskriterien auf Baustoffebene in der Regel nicht ausreichend und der leistungsbezogene Nachweis der Dauerhaftigkeit sollte bauteilbezogen erfolgen unter Berücksichtigung der säureinduzierten Querschnittsschwächung.

Derartige bauteilbezogene Betrachtungen erfordern zwingend eine Prognose der zeitabhängigen Betonschädigung. Daher wird in diesem Beitrag zunächst ein Schädigungsmodell vorgestellt, das – im Gegensatz zu den derzeit verfügbaren Modellen – zusätzlich den Abtrag der geschädigten Betonrandzone berücksichtigt und damit deutlich realitätsnähere Schädigungsprognosen ermöglicht.

Neben der Leistungsfähigkeit des Modells hinsichtlich der darin berücksichtigten Schädigungsmechanismen ist die Validität solcher Prognosen auch von der Verfügbarkeit und Qualität der benötigten Modellparameter abhängig. Die materialspezifischen Modellparameter zur Beschreibung des Widerstands sind nach wie vor aus Säureprüfungen abzuleiten. Hierzu werden nachfolgend neue zerstörungsfreie Techniken und Methoden zur Erfassung und Quantifizierung der Betonschädigung bei Säureprüfungen betrachtet und vergleichend gegenübergestellt.

2 PROGNOSE DER ZEITABHÄNGIGEN SCHÄDIGUNG

2.1 Modellansätze zur Beschreibung der Schädigung

Modelle zur Prognose der zeitabhängigen Schädigung lassen sich nach Nilsson (2006) in Ingenieurmodelle und wissenschaftliche Modelle unterscheiden. Ingenieurmodelle basieren im Wesentlichen auf Erfahrungen und stellen eine Kombination aus vereinfachten mathematischen Modellansätzen und experimentell sowie real ermittelten Daten dar. Demgegenüber stehen physikalisch-chemisch basierte Modelle, die darauf abzielen, die zugrundeliegenden Prozesse möglichst exakt und naturwissenschaftlich begründet zu beschreiben (Nilsson 2006).

Bei der Betrachtung der in den vergangenen Jahren entwickelten naturwissenschaftlichen Modelle zur Beschreibung von Korrosionsprozessen beim Säureangriff (vgl. z. B. Franke et al. (2009)) wird deutlich, dass diese eine Vielzahl an Eingangsparametern (Porositätsdaten, Transportdaten) erfordern, deren Bestimmung mit einem erheblichen Aufwand verbunden ist. Darüber hinaus führt die Komplexität der gewählten Ansätze zu Modellgleichungen, die in der Regel numerische Näherungsverfahren zur Lösung erfordern. Dadurch ist die für Bemessungszwecke erforderliche baupraktische Anwendbarkeit dieser Modelle nur bedingt gegeben (Gerlach 2017).

Ingenieurmodelle können sowohl auf rein empirischen Zusammenhängen beruhen als auch theoretisch bzw. naturwissenschaftlich begründet sein. Eine Zusammenstellung ausgewählter, in der Literatur veröffentlichter empirischer Modelle zur Prognose der Schädigung beim Säureangriff findet sich u. a. in Gerlach (2017). Als derzeit gängigstes Ingenieurmodell zur Beschreibung der Betonschädigung beim Säureangriff kann das im fib MC 2010 aufgeführte Modell zur Beschreibung der Betondegradation infolge des Angriffs von Säuren gesehen werden. Dieses ermöglicht die zeitabhängige Prognose der Schädigungstiefe unter der Voraussetzung, dass der Abtrag der geschädigten Betonrandzone vernachlässigbar ist. Unter der Annahme, dass die Konzentration der angreifenden Säure konstant ist, kann die Entwicklung der Schädigungstiefe mit folgender Funktion beschrieben werden:

$$x_c(t) = k_c \cdot \sqrt{c_s \cdot t} \quad (1)$$

mit:

x_c	Schädigungstiefe
k_c	Materialkonstante zur Beschreibung des Materialwiderstands
c_s	Säurekonzentration an der Betonoberfläche
t	Zeit

Die dem Modell nach fib MC 2010 zugrunde gelegte Annahme, dass der Abtrag der geschädigten Betonrandzone vernachlässigbar ist, muss kritisch bewertet werden, da die durch Säuren induzierte Schädigung immer mit einer Entfestigung der Betonrandzone verbunden ist, die in der Regel einen Abtrag der Betonoberfläche bedingt (vgl. z. B. Franke et al. (2010), Gerlach (2017) und Herold (1999)). Die Bedeutung und der Einfluss des Oberflächenabtrags auf den Schädigungsprozess beim lösenden Betonangriff wurde erstmals von Grube & Rechenberg (1987) hervorgehoben. In theoretischen Überlegungen und experimentellen Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass der Abtrag der Betonoberfläche die Schädigungsentwicklung maßgeblich beeinflusst. Durch den Abtrag weicht der Schädigungsprozess vom charakteristischen Wurzel-Zeit-Verlauf ab, wie er in obiger Gl. (1) unterstellt wird, und führt bei langen Beanspruchungsdauern zu einer annähernd linearen Entwicklung der Schädigungstiefe mit der Zeit. Die Vernachlässigung des Oberflächenabtrags hat folglich eine Unterschätzung der zu erwartenden Schädigung zur Konsequenz.

2.2 Diffusions-Abtrags-Modell

Zur Berücksichtigung des oberflächigen Abtrags für realitätsnahe Schädigungsprognosen wurde in Gerlach (2017) ein physikalisch begründetes Diffusions-Abtrags-Modell entwickelt, das neben der säureinduzierten Tiefenschädigung auch den oberflächigen Abtrag berücksichtigt. Das Modell beschreibt den diffusionskontrollierten Stofftransport der Reaktanten (H_3O^+ -Ionen) zur Reaktionszone sowie den Abtransport der Reaktionsprodukte aus der Reaktionszone. Durch die chemische Umsetzung der H_3O^+ -Ionen in der Reaktionszone wandert diese mit der Zeit sukzessive in das Beton- bzw. Bauteilinnere. Dadurch bildet sich eine geschädigte Zone einerseits und eine intakte Zone andererseits aus, die durch die Reaktionszone bzw. Schädigungsfront getrennt werden. Die treibende Kraft für den Stofftransport ist der Konzentrationsgradient zwischen der angreifenden Säure und dem Bauteilinneren (intakte Zone). Dabei wird die Annahme getroffen, dass die Konzentration an der Betonoberfläche c_s und die Konzentration im Bauteilinneren c_0 konstant sind. Zusätzlich ist der Schädigungsprozess durch den Abtrag der Betonoberfläche bzw. der geschädigten Zone gekennzeichnet. Da es sich beim Abtrag um einen oberflächenkontrollierten Prozess handelt, kann die Annahme getroffen werden, dass dieser Prozess linear mit der Zeit verläuft. Die komplette Schädigungstiefe (geschädigte Zone) setzt sich folglich aus einer Diffusionstiefe bzw. Diffusionszone (x_d) und einer Abtragstiefe (x_e) zusammen. Diese konzeptionelle Betrachtung der ablaufenden Schädigungsmechanismen ist zusammenfassend in Bild 1 dargestellt.

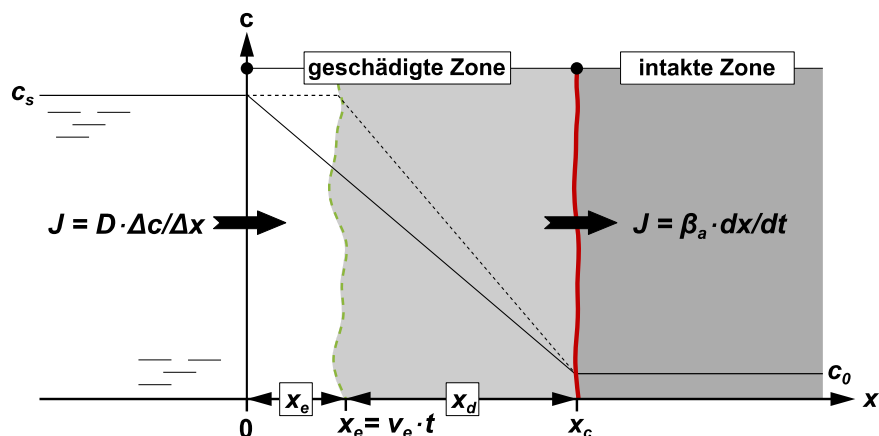


Bild 1: Konzeptioneller Modellansatz des Diffusions-Abtrags-Modells
(Schädigungstiefe $x_c = \text{Abtragstiefe } x_e + \text{Diffusionstiefe } x_d$)

Die Überführung dieses konzeptionellen Modellansatzes in ein mathematisches Modell führt zu einer Differentialgleichung, deren analytische Lösung die Modellgleichung des Diffusions-Abtrags-Modells zur zeitabhängigen Beschreibung der Schädigungstiefe darstellt. Diese ist in Gl. (2) aufgeführt. Die Herleitung dieser Modellgleichung kann Gerlach (2017) entnommen werden.

$$x_c(t) = \frac{(R_a^{-1})^2 \cdot c_s}{2 \cdot v_a} \cdot \left[W \left(-\exp \left(\frac{2 \cdot t \cdot v_a^2}{c_s \cdot (R_a^{-1})^2} - 1 \right) \right) + 1 \right] + t \cdot v_a \quad (2)$$

$$x_c(t) = x_d + x_e$$

mit:

x_c	Schädigungstiefe
R_a^{-1}	inverser Materialwiderstand
c_s	Säurekonzentration an der Betonoberfläche
v_a	Abtragsgeschwindigkeit
t	Zeit
$W(\cdot)$	Lambert'sche W-Funktion

Die Gleichung zur Beschreibung des Diffusions-Abtrags-Problems besteht aus zwei additiven Termen. Während der erste Term die zeitabhängige Entwicklung der Diffusionstiefe beschreibt, berücksichtigt der zweite Term die zeitabhängige Entwicklung der Abtragstiefe. Zur besseren Verdeutlichung sind in Bild 2 die einzelnen Schädigungsanteile (Diffusionstiefe und Abtragstiefe) separat dargestellt sowie die daraus resultierende Schädigungstiefe. Es wird deutlich, dass die linear mit der Zeit zunehmende Abtragstiefe zu Beginn der Säurebeanspruchung nur sehr wenig zur (Gesamt) Schädigungstiefe beiträgt, während sie bei langandauernden Einwirkungen sehr dominant wird.

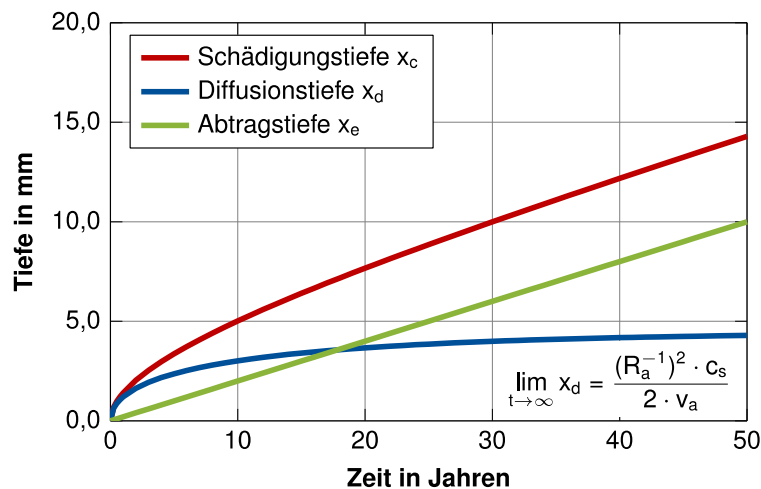


Bild 2: Zeitliche Entwicklung der Schädigungsanteile nach Gl. (2) aus Abtragstiefe und Diffusionstiefe sowie die daraus resultierende Schädigungstiefe ($c_s = 10^{-4,0}$ mol/l, $R_a^{-1} = 7,5$ mm/(d·mol/l) $^{-0,5}$, $v_a = 0,2$ mm/a)

Weiterhin verdeutlicht Bild 2, dass die Diffusionstiefe mit zunehmender Dauer gegen einen Grenzwert konvergiert und annähernd konstant bleibt. Dieses Verhalten stimmt mit der gängigen Korrosionskinetik beim lösenden Betonangriff überein (vgl. z. B. Gerlach & Lohaus (2016) und Herold (1999)). Eine Betrachtung des Grenzwerts $\lim x_d$ zeigt, dass die Diffusionstiefe mit steigender Konzentration zunimmt, was mit den in der Literatur dokumentierten Beobachtungen übereinstimmt (vgl. z. B. Grabau (1995) und Bertron et al. (2005)). Weiterhin nimmt x_d mit steigendem Materialwiderstand (abnehmendem R_a^{-1}) ab, was auch gängigen Erfahrungswerten entspricht.

Somit kann zusammenfassend festgehalten werden, dass das entwickelte Schädigungsmodell die Korrosionskinetik beim lösenden Betonangriff gut widerspiegelt, mit vorhandenen Erfahrungswerten übereinstimmt und plausible und nachvollziehbare Ergebnisse liefert.

Im Vergleich zum Diffusionsansatz nach Gl. (1), der im Wesentlichen den Transport der angreifenden H_3O^+ -Ionen in der geschädigten Zone sowie deren chemische Umsetzung an der Schädigungsfront beschreibt, kann mithilfe des Diffusions-Abtrags-Modells nach Gl. (2) zusätzlich der oberflächliche Abtrag der geschädigten Zone berücksichtigt werden. Zur besseren Verdeutlichung sind in Bild 3 zeitliche Entwicklungen von Schädigungstiefen in Abhängigkeit von unterschiedlichen Abtragungsgeschwindigkeiten dargestellt. Bei der gewählten Parametrisierung der Modellgleichung wird bereits bei einer Abtragungsgeschwindigkeit von 0,4 mm/a die Schädigungstiefe nach 50 Jahren mehr als verdoppelt. Weiterhin wird aus Bild 3 ersichtlich, dass sich das Diffusions-Abtrags-Modell für v_a gegen Null an das Diffusionsmodell nach Gl. (1) annähert.

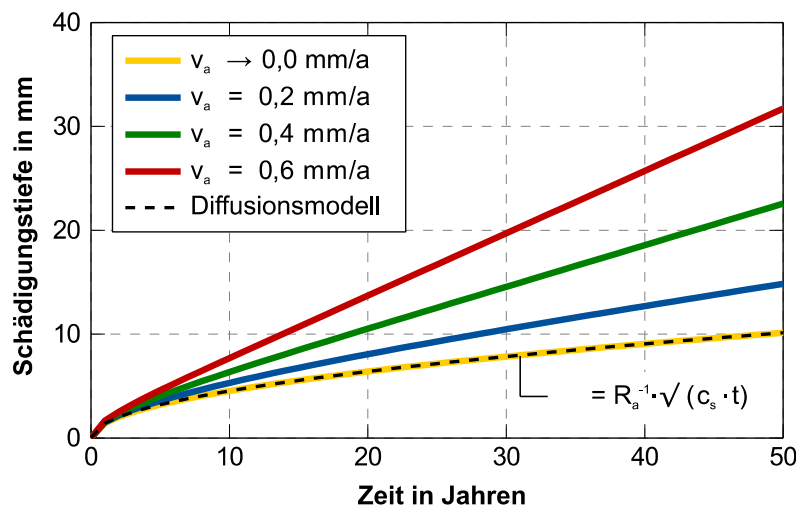


Bild 3: Zeitliche Entwicklung der Schädigungstiefe in Abhängigkeit von der Abtragungsgeschwindigkeit v_a nach Gl. 2 ($c_s = 10^{-4,0}$ mol/l, $R_a^{-1} = 7,5$ mm/(d·mol/l) $^{-0,5}$)

Neben der Konzentration der angreifenden Säure c_s wird die Schädigungstiefe nach Gl. 2 durch die materialabhängigen Parameter inverser Materialwiderstand R_a^{-1} und Abtragungsgeschwindigkeit v_a bestimmt.

Der inverse Materialwiderstand berücksichtigt den Einfluss der Betonzusammensetzung auf den Korrosionsprozess und erfasst die Zementart und den Zementgehalt, mögliche Zusatzstoffe, den w/z-Wert sowie die Löslichkeit der Gesteinskörnung. Da bislang keine mathematische Formel zur Abschätzung dieser Materialkonstante existiert, ist sie aus „geeigneten experimentellen Untersuchungen“ abzuleiten (fib MC 2010).

Die Abtragungsgeschwindigkeit v_a bzw. der Oberflächenabtrag hängt neben ggf. vorhandenen abrasiven Beanspruchungen und der Art und Konzentration der angreifenden Säure auch von der Widerstandsseite (Bindemittel, Sieblinie und Gesteinskörnung) ab. Da dieser Parameter bei der Beurteilung des Säurewiderstands bislang kaum berücksichtigt wurde, fehlen abgesicherte Erkenntnisse. Die Abtragungsgeschwindigkeit ist daher – wie der Materialwiderstand – im Rahmen von Säureprüfungen zu bestimmen.

Die Bestimmung und Ableitung dieser beiden Modellparameter erfordert, dass die Betonschädigung (Schädigungs- und Abtragstiefe) säurebeanspruchter Proben erfasst und quantifiziert wird. Im nachfolgenden Kapitel werden daher unterschiedliche Methoden zur Erfassung und Quantifizierung der Schädigung betrachtet.

3 QUANTIFIZIERUNG DER SCHÄDIGUNG

3.1 Übersicht

Zur Quantifizierung der Schädigung säurebeanspruchter Betone stehen unterschiedliche Verfahren zur Verfügung. Dabei kann zwischen folgenden grundlegenden Methoden unterschieden werden:

- optische bzw. mikroskopische Methoden
- chemisch/mineralogische Methoden
- indirekte Methoden, die aus der Änderung von physikalischen Eigenschaften Rückschlüsse auf die Schädigung zulassen (z. B. Masseänderung und Restfestigkeit)

Die gängigste Methode zur Schädigungserfassung stellt derzeit die mikroskopische Ermittlung der Schädigungs- und ggf. Abtragstiefe am präparierten Querschnitt dar. Die Visualisierung des Mikrogefüges erfolgt entweder mithilfe der Auflichtmikroskopie am Anschliff oder mittels Durchlicht-(Polarisations)-Mikroskopie am Dünnschliff.

In Bild 4 ist exemplarisch eine auflichtmikroskopische Aufnahme einer säurebeanspruchten Mörtelprobe dargestellt, wobei die Probe für 21 Tage mit Essigsäure (2,5 %) beaufschlagt wurde. Es wird ersichtlich, dass die geschädigte Zone mikroskopisch gut detektiert werden kann. Bei der betrachteten Probe ergibt sich eine mittlere Abtragstiefe von ca. 0,5 mm sowie eine mittlere Schädigungstiefe von knapp 3 mm. Während die Auflichtmikroskopie im Wesentlichen eine Visualisierung der geschädigten Bereiche ermöglicht, lassen sich mittels der Durchlichtmikroskopie mit Polarisationsfiltern darüber hinaus noch unterschiedlich geschädigte Zonen identifizieren.

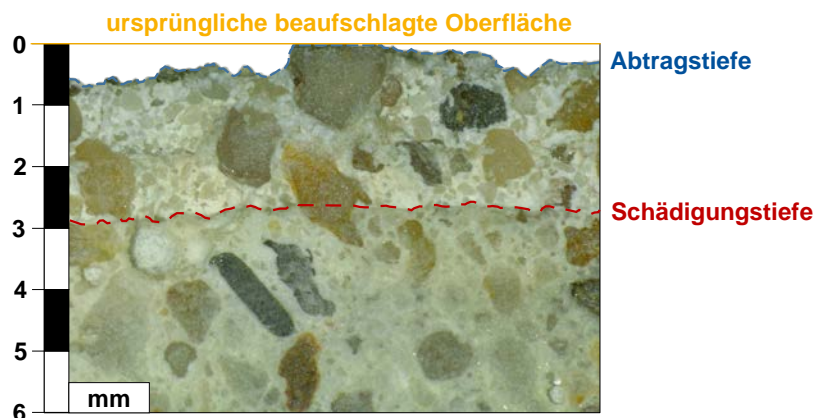


Bild 4: Auflichtmikroskopische Aufnahme einer mit Essigsäure beaufschlagten Mörtelprobe (21 d Säureangriff mit 2,5 %-iger Essigsäure)

Ein wesentlicher Nachteil mikroskopischer Methoden ist, dass mit der Probenpräparation eine Zerstörung der zu untersuchenden Probe verbunden ist. Folglich ist das mehrmalige Messen einer identischen Probe zu unterschiedlichen Zeitpunkten der Beanspruchung nicht möglich. Vor diesem

Hintergrund werden nachfolgend zerstörungsfreie Messmethoden zur Erfassung und Quantifizierung der Schädigung betrachtet.

3.2 Ansätze zur zerstörungsfreien Erfassung der Schädigung

Alternativ zu zerstörenden Methoden kann die Erfassung und Quantifizierung säureinduzierter Schädigung auch durch zerstörungsfreie Methoden erfolgen. Um die Möglichkeiten und Potentiale derartiger Methoden zu bewerten, wurden am Institut für Baustoffe Gefügeuntersuchungen mittels Mikro-Röntgen-Computertomographie (μ -XCT) und Magnetresonanztomographie (engl. Nuclear Magnetic Resonance tomography; NMR tomography) durchgeführt.

In den Untersuchungen wurden zylindrische Mörtelproben ($d/h = 10 \text{ mm} / 20 \text{ mm}$) für 21 Tage mit 2,5 %-iger Essigsäure beaufschlagt. Um einen eindimensionalen Angriff zu gewährleisten, wurden im Vorfeld der Untersuchungen sowohl die Mantelfläche als auch die der säurebeaufschlagten Seite abgewandten Deckfläche der einzelnen Proben mit Epoxidharz beschichtet. Anschließend wurden die Proben für zwei Wochen drucklos in Leitungswasser gelagert, um eine möglichst gleichmäßige Wassersättigung der Proben sicherzustellen. Vor der darauffolgenden Säurebeanspruchung erfolgten die Referenzmessungen an den ungeschädigten Proben. Darüber hinaus wurden die μ -XCT- und NMR-Messungen nach 7 Tagen und 21 Tagen durchgeführt.

Ziel der Gefügeuntersuchungen mittels μ -XCT war es, die zeitliche und räumliche Entwicklung der Schädigungsfront anhand von Röntgen-Absorptionsbildern zu rekonstruieren. Mithilfe des zugrundeliegenden Messprinzips, das auf einer unterschiedlich starken Schwächung von Röntgenstrahlung in Abhängigkeit des Absorptionskoeffizienten bzw. der Dichte der durchstrahlten Materie beruht, sollte die mit der Säureschädigung verbundene erhöhte Porosität im Zementsteingefüge erfasst werden. Bereiche hoher Dichte und geringer Porosität (z. B. Gesteinskörnung) erscheinen in den rekonstruierten Schnittbildern hell, Bereiche geringerer Dichte (Poren, geschädigte Zementsteinmatrix) erscheinen dunkel.

Die Mörtelproben wurden einheitlich mit dem Mikrofokus-Röntgenmikroskop Xradia Versa 410 (Fa. Zeiss) tomografiert. Das verwendete μ -XCT oder Röntgenmikroskop bietet zusätzlich zur geometrischen Vergrößerung, die sich durch den Abstand von Röntgenröhre zur Probe sowie von der Probe zum Detektor einstellen lässt, eine optische Vergrößerung durch Objektive, die dem Detektor vorgeschaltet sind.

Die Tomografien wurden bei einer Spannung von 80 kV und einer Stromstärke von 125 μ A erstellt. Dies resultiert in einer Brennfleckgröße (spot size) von 7 μ m. Mit einem Fokus-Objekt-Abstand von 35 mm und einem Objekt-Detektor-Abstand von 165 mm sowie einer optischen Vergrößerung von 0.4 ergab sich für die Aufnahmen eine Pixelgröße von 12 μ m. Die Aufnahme der Probekörper erfolgte mit 3201 Projektionen über 360° und einer Belichtungszeit von 2 Sekunden.

Bild 5 zeigt exemplarisch die tomographischen Rekonstruktionen von Zylinderquerschnitten (Auszug) einer säurebeanspruchten Probe zu den unterschiedlichen Betrachtungszeitpunkten. Es wird ersichtlich, dass der Schädigungsfortschritt über die Zeit eindeutig erkennbar ist und sowohl Abtragstiefe als auch Schädigungstiefe visuell erfasst werden können.

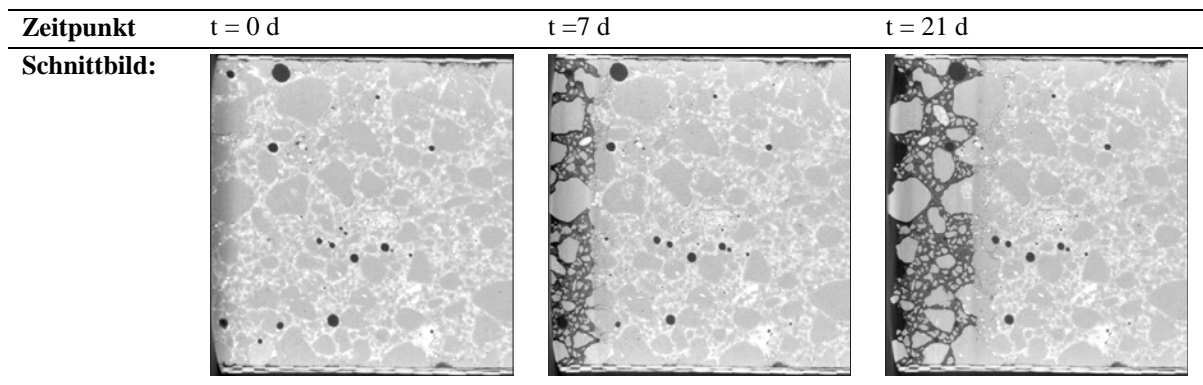


Bild 5: Röntgenmikroskopische 2D-Querschnittsaufnahmen einer säurebeanspruchten Mörtelprobe (Essigsäure, 2,5 %; Mörtel w/z = 0,5; CEM I 42,5 R) zu unterschiedlichen Zeitpunkten

Zur Quantifizierung der Schädigung wurden die Querschnittsaufnahmen in Binärbilder (8 Bit) umgewandelt und die Grauwerte tiefengestaffelt gemittelt. Die Entwicklung der gemittelten Grauwerte über die Tiefe sind in Bild 6 für die unterschiedlichen Betrachtungszeitpunkte dargestellt.

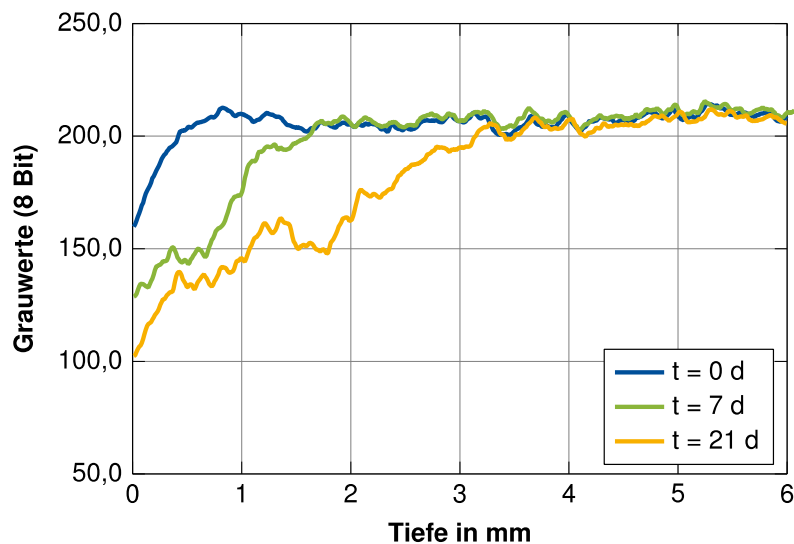


Bild 6: Tiefenabhängige Grauwerte (Mittelwerte) von röntgenmikroskopischen Querschnittsaufnahmen einer säurebeanspruchten Mörtelprobe zu unterschiedlichen Zeitpunkten

Bei der Betrachtung der über die Tiefe gemittelten Grauwerte in Bild 6 fällt auf, dass diese für die Referenzmessung ($t = 0$ d) annähernd konstant verlaufen, wobei es im oberflächennahen Bereich zu einer Abnahme kommt. Diese Abnahme kann einerseits mit der nicht ganz ebenen Oberfläche begründet werden. Andererseits resultiert dies aus Messartefakten infolge von sogenannten Strahlaufhärtungen. Weiterhin wird aus Bild 6 ersichtlich, dass mit der gewählten Auswertemethodik die Gefügeschädigung quantitativ erfasst werden kann. Anhand des Vergleichs der tiefenabhängigen Grauwerte der Referenzmessung mit den Messungen nach 7 und 21 Tagen kann für die beiden Zeitpunkte auf eine Schädigungstiefe geschlossen werden. Nach 7 Tagen liegt diese bei ca. 1,5 mm, nach 21 Tagen bei knapp 3 mm. Die nach 21 Tagen ermittelte Schädigungstiefe steht im guten Einklang mit der mittels Auflichtmikroskopie ermittelten Schädigungstiefe. Diese wurde im Anschluss an die Untersuchungen am Anschliff ermittelt und ist in Bild 4 dargestellt.

Als eine weitere Methode zur zerstörungsfreien Erfassung der säureinduzierten Schädigung wurde im Rahmen der Untersuchungen die Magnetresonanztomographie betrachtet, die eine tiefengestaffelte Bestimmung des Wassergehalts in den Mörtelzylindern ermöglicht.

Mittels eines NMR-Niederfeldgerätes vom Typ *BRUKER minispec mq10 NMR Analyzer* mit einer magnetischen Feldstärke von 0.235 T und einem Gradientensystem wurden zu den gewählten Betrachtungszeitpunkten Feuchteprofile entlang der Zylinderachse aufgenommen. Die eingesetzte Pulssequenz ist in Hardy (2012) näher erläutert. Dieses Verfahren wurde bereits in Untersuchungen von Djuric et al. (2016) und Djuric (2017) zum Feuchtetransportverhalten unter Frostbeanspruchung eingesetzt. Dabei konnte ein für hohe Sättigungsgrade ein linearer Zusammenhang zwischen detektierter Signalintensität und gravimetrisch ermittelter Feuchtemenge nachgewiesen werden.

Basierend auf der Referenzmessung der zu Versuchsbeginn vollständig gesättigten Probekörper lässt die gemessene orts aufgelöste Signalintensität Rückschlüsse auf den im Zuge des Säureangriffs neu geschaffenen Porenraum zu. Für die Darstellung in Bild 7 wurde eine Normierung bezüglich einer Silikonöl-Referenzprobe mit homogener Spindichte gewählt, um die Einflüsse aus der lokalen Sensitivität des Aufbaus auszugleichen. Eine höhere normierte Signalintensität entspricht dabei einer höheren Wassermenge und infolge der vorhandenen Vollsättigung der Proben dem zusätzlichen durch den Säureangriff geschaffenen Porenraum.

In Bild 7 sind die gemessenen orts aufgelösten normierte Signalintensitäten für die unterschiedlichen Betrachtungszeitpunkte dargestellt. Aus dem Vergleich der einzelnen Verläufe können ähnlich wie bei der vorherigen Betrachtung der tiefenabhängigen Grauwerte, Rückschlüsse auf die Schädigungstiefe gezogen werden, wobei Bereiche erhöhter Signalintensität auf eine erhöhte Porosität bzw. auf eine Säureschädigung hinweisen. Es wird ersichtlich, dass sich für 7 Tage eine Schädigungstiefe von knapp 2 mm ergibt und für 21 Tage eine Schädigungstiefe von ca. 4,0 mm. Diese Werte sind im Vergleich zu den vorherigen mikroskopischen Betrachtungen leicht erhöht. Dies könnte einerseits an der in der Auswertung gewählten Ortsauflösung liegen, andererseits aber auch auf Änderungen des Gefüges hindeuten, die auflichtmikroskopisch nicht erfasst werden können. Grundsätzlich wird jedoch deutlich, dass mittels NMR die Gefügeschädigung und der zeitabhängige Schädigungsfortschritt beim Säureangriff erfasst werden kann.

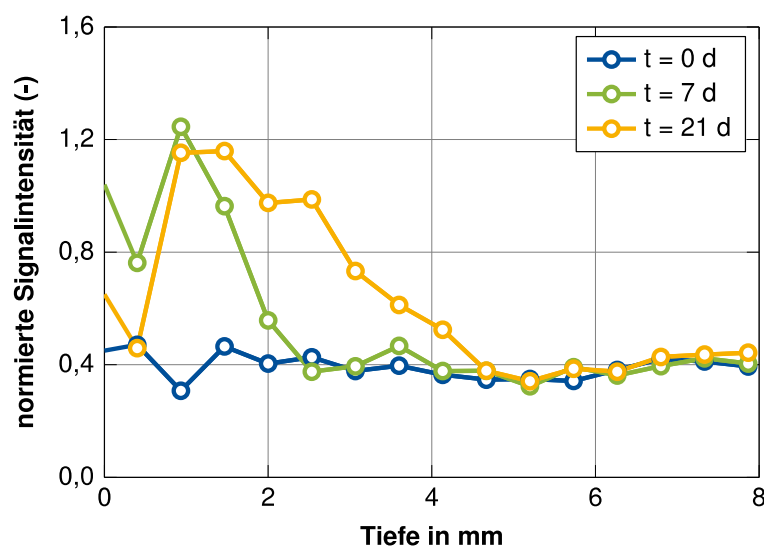


Bild 7: Orts aufgelöste Signalintensitäten einer säurebeanspruchten Mörtelprobe zu unterschiedlichen Zeitpunkten

In Bild 8 werden abschließend die einzelnen Methoden zur Erfassung der Schädigung vergleichend gegenübergestellt. Es wird deutlich, dass sowohl die Mikro-Röntgen-Computertomographie als auch die Magnetresonanztomographie die Möglichkeit bieten, die Schädigung säurebeanspruchter Betone zerstörungsfrei zu erfassen und zu quantifizieren. Beide Methoden liefern ähnliche Rückschlüsse hinsichtlich der zu erwartenden Schädigung und deren zeitlichen Entwicklung. Sie stellen daher eine geeignete Alternative zu zerstörenden mikroskopischen Analysen dar.

Weiterhin wird aus Bild 8 ersichtlich, dass der tiefenabhängige Verlauf der Grauwerte und der Signalintensitäten ähnliche Charakteristika aufweisen. Demnach ist zu erwarten, dass neben der hier abgeleiteten Schädigungstiefe auch weitere Rückschlüsse hinsichtlich tiefenabhängiger Gefügeeigenschaften und des Schädigungsgrads möglich sind. Dieser Aspekt wird Inhalt weiterer Forschungsarbeiten sein.

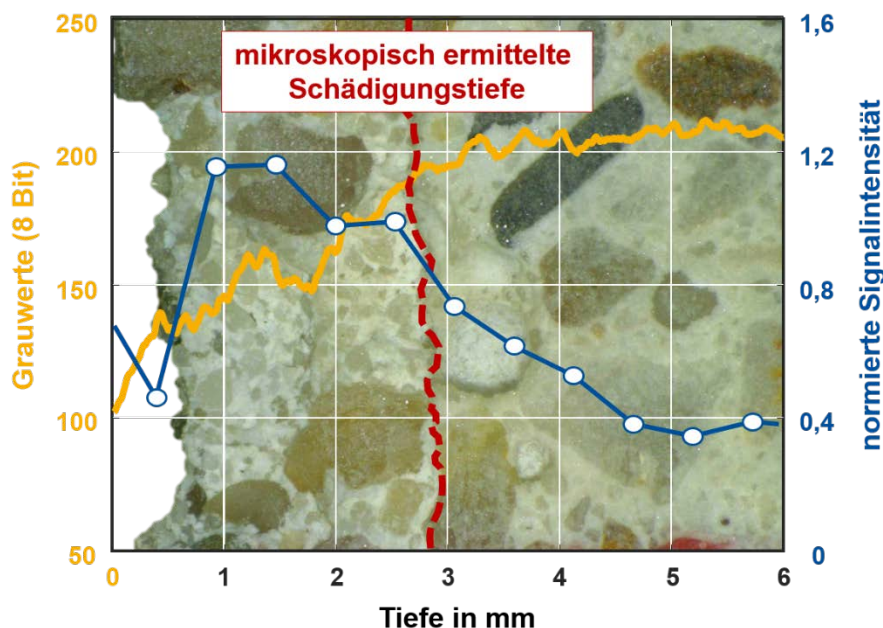


Bild 8: Vergleich unterschiedlicher Methoden zur Erfassung und Quantifizierung der Gefügeschädigung beim Säureangriff (hier dargestellt: 21 d Säureangriff mit 2,5 %-iger Essigsäure)

4 SCHLUSSBETRACHTUNG

Performance-basierte Konzepte zur Sicherstellung der Dauerhaftigkeit gewinnen aufgrund der Grenzen des derzeitigen deskriptiven Konzepts zunehmend an Bedeutung. Sie sehen vor, die Eignung eines Betons anhand von anerkannten Prüfverfahren und Leistungskriterien nachzuweisen. Bei säurebeanspruchten Bauteilen ist jedoch zu beachten, dass diese am Ende ihrer Nutzungsdauer reduzierte Abmessungen aufweisen können. Demnach ist die alleinige Betrachtung von baustofflichen Leistungskriterien i. d. R nicht ausreichend. Vielmehr ist ein bauteilbezogener Nachweis erforderlich, der die säureinduzierte Querschnittsschwächung berücksichtigt. Dies erfordert ein entsprechendes Prognosemodell, das die zeitabhängige Entwicklung der Schädigung beschreibt.

Daher wurde in diesem Beitrag ein physikalisch begründetes Diffusions-Abtrags-Modell vorgestellt, dass neben der säureinduzierten Tiefenschädigung auch den oberflächigen Abtrag der geschädigten Betonrandzone berücksichtigt. Es konnte gezeigt werden, dass das entwickelte Modell die

Korrosionskinetik beim lösenden Betonangriff gut abbildet und dass das Modellverhalten mit vorhandenen Erfahrungswerten übereinstimmt. Im Vergleich zu derzeit verfügbaren Modellen ermöglicht dieses Modell durch die zusätzliche Berücksichtigung des Abtrags der geschädigten Betonrandzone deutlich realitätsnähere Schädigungsprognosen.

Neben dem Bereich der Dauerhaftigkeitsbemessung kann das Diffusions-Abtrags-Modells auch im Bereich der Instandhaltung, beispielsweise bei der Abschätzung von Restnutzungsdauern oder der Dimensionierung von Betonersatzsystemen, Anwendung finden.

Für die Prognose der Betonschädigung beim Säureangriff sind die erforderlichen Modellparameter aus Säureprüfungen abzuleiten. Bisher verwendete mikroskopische Analysen erfordern eine zerstörende Probenpräparation vor der Untersuchung. Daher wurden zusätzlich neue zerstörungsfreie Methoden zur Erfassung und Quantifizierung der Schädigung betrachtet. Dabei lag der Fokus sowohl auf der Mikro-Röntgen-Computertomographie als auch der Magnetresonanztomographie. Anhand vergleichender Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass beide Methoden die Möglichkeit bieten, die Schädigung säurebeanspruchter Betone zerstörungsfrei zu erfassen. Vor diesem Hintergrund stellen sie eine geeignete Alternative zu zerstörenden mikroskopischen Analysen dar.

LITERATUR

- Bertron, A., Duchesne, J. & Escadeillas, G. (2005): Accelerated tests of hardened cement pastes alteration by organic acids: analysis of the pH effect, *Cement and Concrete Research* Vol. 35(2005), No. 1, S. 155–166.
- Beushausen, H. Alexander, M. G., Basheer, M., Baroghel-Bouny, V., d'Andréa, R., Gonçalves, A., Gulikers, J., Jacobs, F., Khrapko, M., Monteiro, A. V., Nanukuttan, S. V., Otieno, M., Polder, R. & Torrent, R. (2016): Principles of the Performance-Based Approach for Concrete Durability, In: *Performance-Based Specifications and Control of Concrete Durability: State-of-the-Art Report RILEM TC 230-PSC*. Springer Netherlands, S. 107–131.
- Duric, Z. (2017): Sättigungsverhalten und Schädigung von Zementstein bei Frostbeanspruchung, Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe, 2017.
- Djuric, Z., Haist, M., Hardy, E. H., Sester, J., Radel, B., Spinnler, V. & Müller, H. S. (2016): Quantification of water transport induced by cyclic freeze-thaw actions using NMR techniques, In: *Proceedings of the 3rd International RILEM Conference on Microstructure Related Durability of Cementitious Composites*, Nanjing, China, 2016.
- fib MC 2010 (2013): *fib Model Code for Concrete Structures 2010*, federation internationale du beton (fib), Ernst & Sohn Verlag.
- Franke, L., Deckelmann, G. & Espinosa-Marzal, R. (2009): *Simulation of Time Dependent Degradation of Porous Materials - Final Report on Priority Program 1122*, Cuvillier Verlag.
- Gehlen, C., Mayer, T. F. & Greve-Dierfeld, S. von (2011): Lebensdauerbemessung, In: *Beton-Kalender 2011*, Ernst & Sohn, S. 229–278.
- Gerlach, J. (2017): Ein performance-basiertes Konzept zur Dauerhaftigkeitsbemessung chemisch beanspruchter Betonbauteile, Dissertation, Leibniz Universität Hannover, Institut für Baustoffe.
- Gerlach, J. & Lohaus, L. (2016): Sachstandbericht – Verfahren zur Prüfung des Säurewiderstands von Beton, Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton, Heft 620, Beuth Verlag, Berlin.

- Grabau, J. (1994): Untersuchungen zur Korrosion zementgebundener Materialien durch saure Wässer unter besonderer Berücksichtigung des Schwefelsäureangriffs, Dissertation, TU Hamburg-Harburg.
- Grube, H. & Rechenberg, W. (1987): Betonabtrag durch chemisch angreifende saure Wässer (Teil 1 und 2), *beton* 37, Heft 11, 446-451 und Heft 12, S. 495-499.
- Hardy, E. H. (2012): *NMR Methods for the Investigation of Structure and Transport*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. Seiten 157-159.
- Herold, G. (1999): Korrosion zementgebundener Werkstoffe in mineral-sauren Wässern, Dissertation, Universität Karlsruhe.
- Nilsson, L.-O. (2006): Present limitations of models for predicting chloride ingress into reinforced concrete structures, *Journal de Physique IV* Vol. 136, S. 123–130.