

Ursachen und Vermeidung von Frost- und Frost-Tausalz-Schäden

Witterungswiderstand von Betonen; Teil 1

Karl-Uwe Voß, Neuwied

Betone für Außenbauteile müssen einen ausreichenden Witterungswiderstand (Frost- und ggf. auch Frost-Tausalz-Widerstand) aufweisen. Frost- und Frost-Tausalz-Schäden werden in erster Linie dadurch verursacht, dass sich Wasser beim Gefrieren um rd. 9 % ausdehnt und somit einen erheblichen Druck auf die Porenwände des Betons ausübt. Bei der Einwirkung von Tausalz kommen weitere Schadensmechanismen hinzu, die sich deutlich verstärkend auf die Schadensintensität auswirken und in erster Linie mit der Gefrierpunktniedrigung des Wassers bei Vorhandensein von Tausalzen und dem Kristallisationsdruck beim Auskristallisieren der Tausalze in Verbindung stehen. Auf die Schadensintensität wirken sich u.a. folgende Einflüsse in erheblichem Umfang aus: Anzahl der Frostwechsel, Geschwindigkeit der Temperaturveränderung, Eingesetztes Taumittel, Größenordnung der Wassersättigung (mäßig oder stark) des Betons. Der Beitrag beschäftigt sich mit den Ursachen für Frost- und Frost-Tausalz-Schäden, mit den Schadenstypen und mit den Möglichkeiten zur Verbesserung des Frost- bzw. Frost-Tausalz-Widerstands.

1 Einleitung

Da die Betonnormen DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 einen deskriptiven Regelungsansatz zur Sicherstellung der Eigenschaften (hier des Witterungswiderstandes) verfolgen, werden in diesen Normen Anforderungen an die Zusammensetzung der Betone (maximaler w/z-Wert, Mindestdruckfestigkeitsklasse und Mindestzementgehalt) gestellt. Werden diese Vorgaben an die Zusammensetzung erfüllt, so wird der Frost- bzw. Frost-Tausalz-Widerstand des Betons als gegeben angenommen. Aus diesem deskriptiven Regelungsansatz heraus ergeben sich die

in der Tabelle F.1 der DIN EN 206-1 genannten Anforderungen an die Zusammensetzung von Betonen, um einen ausreichenden Witterungswiderstand aufzuweisen. Hiernach steigt der Angriffsgrad der Einwirkung von Frost bzw. Frost-Tausalz mit zunehmender Wassersättigung und bei Einwirkung von Tausalz deutlich an.

Aus technischer Sicht kann der Frostwiderstand des Betons (XF1 bzw. XF3) erhöht werden, indem dessen Wasseraufnahme über die Reduzierung des w/z-Werts begrenzt wird. So weisen Betone üblicherweise einen ausreichenden Frostwiderstand auf, wenn

das Porengefüge des Betons bei der Einwirkung von Wasser um weniger als 90 % gefüllt wird. Sind die Poren zu Beginn des Frosteintritts zu einem größeren Anteil mit Wasser gefüllt (Porenfüllung > 90 %), so liegen keine ausreichend großen Expansionsräume im Porensystem vor, sodass innere Spannungen im Bereich der Betonoberfläche entstehen.

Im Schadensfall bilden sich aufgrund dieses Expansionsdrucks zunächst feine Mikrorisse im Gefüge des oberflächennahen Zementsteins (Bild 2), bei weiterer Frosteinwirkung sprengt der oberflächennahen



Bild 1: Abplatzung des oberflächennahen Zementsteins

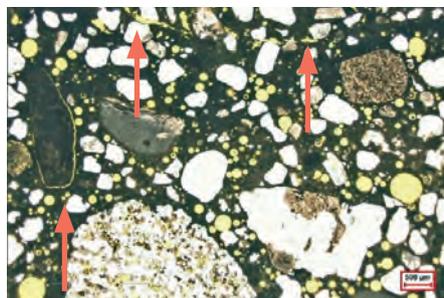
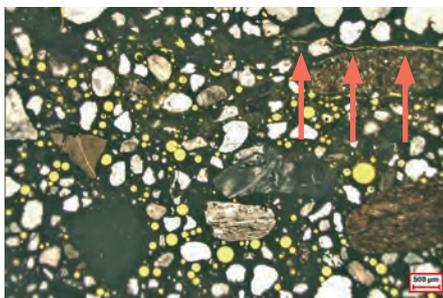


Bild 2: Mikrorissbildung im Bereich der geschädigten Betonoberfläche

Der Autor:

Dr. rer. nat. Karl-Uwe Voß studierte Chemie an der Westfälischen Wilhelms-Universität, Münster. Nach der Promotion war er beim ZEMLABOR in Beckum als Sachbearbeiter und stellvertretender Prüfstellenleiter tätig. Anschließend war er technischer Geschäftsführer der Duisburger Überwachungsverbände und des Baustoffüberwachungsvereins Nordrhein-Westfalen BÜV NW, bevor er als Prüfstellenleiter zum ZEMLABOR zurückkehrte. Seit 2002 ist er Geschäftsführer und Institutsleiter der Materialprüfungs- und Versuchsanstalt Neuwied Forschungsinstitut für vulkanische Baustoffe GmbH. Dr. Karl-Uwe Voß ist öffentlich bestellter und vereidigter Sachverständiger für den Bereich „chemische Analyse zementgebundener Baustoffe“.

nahe Zementstein dann nahezu vollständig ab (Bild 1).

Um Betone mit einem größeren Frost-(XF3) bzw. Frost-Tausalz-Widerstand (XF4) herzustellen, muss der w/z-Wert noch weiter abgesenkt und der Witterungswiderstand der verwendeten Gesteinskörnung erhöht werden. Um Betone herzustellen, die den höchsten Frost-Tausalz-Widerstand (XF4) aufweisen, ist zusätzlich ein Luftporenbildner zu verwenden, der Mikroluftporen mit einer geringen Größe (unter 300 µm) und einem geringen Porenabstand (Abstandsfaktor) in den Beton einbringt und so einen Expansionsraum für das gefrierende Wasser schafft.

2 Schadenstypen

Die Ursachen für die Entstehung von Frost- bzw. Frost-Tausalz-Schäden können sehr vielgestaltig sein. In der Praxis werden häufig die nachfolgenden Schadensursachen vorgefunden:

- Bestellung von Betonen mit falscher Zusammensetzung;
- zu geringe Mikroluftporengehalte im gesamten Beton oder nur in der Betonoberfläche;
- Fehler bei der Einbringung bzw. Nachbehandlung des Betons sowie
- nicht geplante Einwirkung von Tausalzen auf die Betonoberfläche.

Auf die einzelnen Schadensursachen wird in den nachfolgenden Abschnitten detailliert eingegangen.

2.1 Schadensbilder von Frost- und Frost-Tausalz-Schäden

Frost- und Frost-Tausalz-Schäden treten üblicherweise nach den ersten Winterperioden auf und stellen sich

- zum Teil als flächige Abwitterung des Zementsteins (Bild 3),
- zum Teil aber auch als lokal begrenzt auftretende Abwitterungen über einzelnen Gesteinskörnern (s. Bild 5 oder Bild 6) dar.

Derartige Frost-/Frost-Tausalz-Schäden treten verstärkt an horizontalen Flächen auf, können aber auch an vertikal ausgerichteten Bauteilen auftreten, wenn der Beton einer starken Chloridexposition ausgesetzt wird und eine hohe Wassersättigung aufweist. Bild 4 zeigt das Fundament eines Verkehrszeichenträgers an einer Autobahn, an dem Zementsteinabwitterungen aufgetreten sind.

Neben flächigen bzw. teilflächigen Abwitterungen des Zementsteins finden sich nicht selten auch lokal sehr begrenzt auftretende Abwitterungen in der Oberfläche der Betonbauteile. Diese Abwitterungen beginnen im Regelfall über den im oberflächennahen Beton befindlichen groben Gesteins-



Bild 3: Über die Fläche verteilt auftretende, flächige Abwitterungen



Bild 4: Frost-Tausalz-bedingte Abwitterungen auf den vertikal ausgerichteten Flächen des Fundaments eines Verkehrszeichenträgers

körnern und werden häufig fälschlicherweise ohne weitere Untersuchungen auf die Verwendung „mangelhafter“ bzw. nicht geeigneter Gesteinskörnungen zurückgeführt.

Die Vermutung, dass nicht ausreichend witterungsbeständige Gesteinskörner verantwortlich für diese Schäden sind, erweist sich bei näherer Untersuchung oft als falsch. So finden sich zwar ab und an zersetzliche Gesteinskörner im Zentrum dieser Abwitterungen (Bild 5). Viel häufiger werden im Zentrum der Abwitterungen aber völlig intakte Gesteinskörner mit einem dichten Gefüge und einem hohen Frost-Tausalz-Widerstand (Bild 6) vorgefunden.

Bei den in Bild 6 gezeigten Fällen ist die Entstehung der Zementsteinabwitterungen oberhalb der Gesteinskörner (so genannte „Popouts“) nicht auf einen unzureichenden Frost-Tausalz-Widerstand der Gesteinskörnung, sondern auf das Zusammenspiel der nachfolgenden Effekte zurückzuführen:

- Die Porosität dichter Gesteinskörner (die Gesteinskörner im Dünnschliff aus Bild 7 sind an deren dunklerer Farbe erkennbar) ist deutlich geringer als die des Zementsteins (hellgrüne Teilflächen im Dünnschliff aus Bild 7), sodass dem gefrierenden Wasser im Gesteinskorn nur



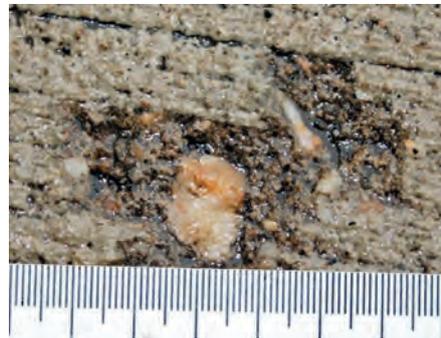
Bild 5: Zersetzliches Gesteinskorn im Zentrum einer Zementsteinabwitterung

ein sehr kleiner freier Expansionsraum zur Verfügung steht. Das im Bereich der Kontaktfläche zwischen dem Zementstein und der Gesteinskörnung befindliche Wasser kann sich somit beim Gefrieren nicht in Richtung des Gesteinskorns ausdehnen und sprengt den aufsitzenen Zementstein ab.

- In der Kontaktzone zwischen dem Zementstein und den dichten Gesteins-



Bild 6: Gesteinskörner mit dichtem Gefüge und einem hohen Frost-Tausalz-Widerstand im Zentrum von Zementsteinabwitterungen



ein nicht ausreichend Frost-Tausalz-beständiger Zementstein in Verbindung mit einer sehr dichten Gesteinskörnung ursächlich für die aufgetretenen Schäden.

2.1.1 Verwendung von Luftporenbildnern zur Herstellung Frost-Tausalz-beständiger Betone (XF4)

Weisen Betone eine große Wasseraufnahme auf, dann müssen entsprechend groß dimensionierte, nicht wassergefüllte Porenräume (Expansionsräume) im Beton zur Verfügung stehen, um die Volumenexpansion des gefrierenden Wassers kompensieren zu können. Das ist auch der Grund dafür, warum übliche Betone, die einer Frost-Tausalz-Belastung ausgesetzt werden, auf Basis der einschlägigen Betonnormen unter Verwendung von Luftporenbildnern hergestellt werden müssen.

Durch die Luftporenbildner werden Mikroluftporen in den Beton eingebracht, die die Kapillarporen des Betongefüges aufweiten und dadurch das kapillare Saugen und somit auch die Wasseraufnahme des Betons reduzieren (reduzierte Kapillarkraft). Infolgedessen werden die Mikroluftporen bei normaler Wasserbeaufschlagung nicht vollständig mit Wasser gefüllt und verbleiben als „freier“ Expansionsraum im Beton. Weisen diese Mikroluftporen geringe Abstände zueinander auf (siehe beispielhaft runde, gelbe Proben in dem rechten Foto von Bild 9), dann besitzt der Beton einen ausreichenden Widerstand gegenüber einer Frost- und Frost-Tausalz-Belastung.

Enthalten Betone keine ausreichenden Mengen an Mikroluftporen (siehe Zone aus dem oberflächennahen Beton in Bild 10 (rote Pfeile)), so ist davon auszugehen, dass Teile des Zementsteins bei der Einwirkung von Frost und Tausalz abwittern.

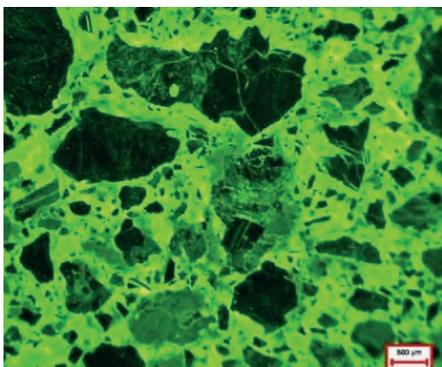


Bild 7: Geringer Expansionsraum im Gesteinskorn (schwarz) im Vergleich zum Zementstein (grün)

körnern bildet sich zum Zeitpunkt der Betonherstellung aufgrund der geringen Wasseraufnahmefähigkeit dieser Gesteinskörner häufig eine dünne Zone mit erhöhter Porosität (hellere Farbe in der Kontaktfläche zwischen Gesteinskorn und Zementstein aus Bild 8), die eine deutlich erhöhte Wasseraufnahmefähigkeit und damit auch eine reduzierte Witterungsbeständigkeit aufweist (rote Pfeile in Bild 8).

In den oben beschriebenen Schadensfällen war somit nicht eine reduzierte Qualität der Gesteinskörnung für die Abwitterung der Betonfläche verantwortlich, vielmehr war

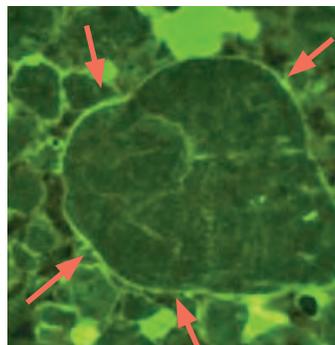
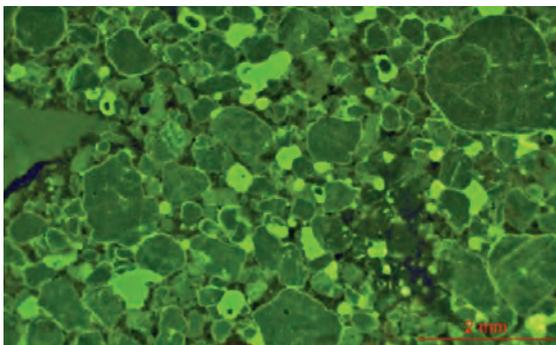
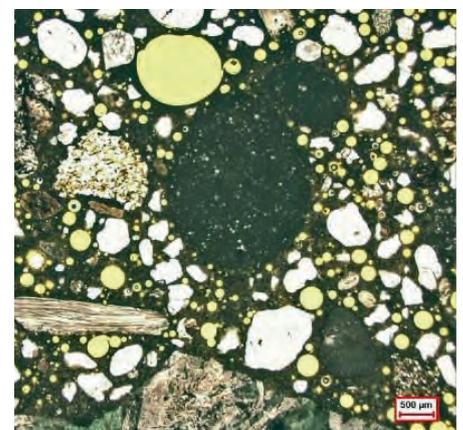


Bild 8: Dünne Zone mit erhöhter Porosität um einzelne im Beton enthaltene Gesteinskörner herum



Bild 9: Bestimmung der Gehalte von Mikroluftporen an Betonen nach DIN EN 480-11

Anmerkung: Gemäß DIN 1045-2/DIN EN 206-1 müssen Betone mit einem erhöhten Widerstand gegen Frost- und Frost-Tausalz-Angriffe im Rahmen der mikroskopischen Untersuchung mindestens 1,5 Vol.-% an Mikroluftporen mit einer Größe von <math>< 300 \mu\text{m}</math> aufweisen. Der Abstandsfaktor zwischen den einzelnen Mikroporen darf gemäß dem FGSV-Merkblatt „Merkblatt für die Herstellung und Verarbeitung von Luftporenbeton“ nicht größer als 0,24 mm sein. Werden diese Anforderungen eingehalten, so ist davon auszugehen, dass der Beton einen hohen Widerstand gegen Frost- und Frost-Tausalzangriffe aufweist.



1.1.2 Einfluss der Gesteinskörnung

Neben der Qualität des Betons (w/z-Wert, Druckfestigkeit, Zementgehalt und Verwendung von Luftporenbildnern) wirkt sich natürlich auch die Witterungsbeständigkeit der Gesteinskörnung auf die Entstehung von Frost- und Frost-Tausalz-Schäden in den Betonflächen aus. In dem Fall des Vorhandenseins einzelner Gesteinskörner mit nicht ausreichender Witterungsbeständigkeit entstehen im oberflächennahen Beton Zementsteinabwitterungen oberhalb dieser Körner (so genannte Popouts, Bild 11).

Bei der Bewertung von Frost- und Frost-Tausalz-Schäden ist zu berücksichtigen, dass weder die Gesteinskörnung noch der daraus hergestellte Beton vollständig witterungsbeständig sein muss. So dürfen sowohl die Gesteinskörner als auch die Betone im Rahmen der normativen Laborversuche gewisse Mengen an Abwitterungen aufweisen, ohne dass diese Produkte als „nicht regelwerkskonform“ zu bewerten sind. Die Menge an Abwitterungen darf nur nicht zu groß sein. Allerdings zeigen gerade die in Bild 11 dargestellten Schäden, dass die Auswahl einer hochwertigen (witterungsbeständigen) Gesteinskörnung zu einer Reduzierung der Menge an Zementsteinabwitterungen beitragen kann, was besonders bei optisch repräsentativen Bauteilen berücksichtigt werden sollte.

3 Verwendung von Luftporenbildnern

Wie oben ausgeführt wurde, müssen Frost-Tausalz-beständige Betone, die einer starken Wassersättigung ausgesetzt werden (XF4-Betone), unter Verwendung von Luftporenbildnern hergestellt werden. Der Nachweis, dass LP-Betone die normativen Anforderungen erfüllen, hat vor der Einbringung des Betons auf der Baustelle über die Bestimmung des Gesamtluftgehalts im LP-Topf zu erfolgen. Sind Schäden eingetreten, so kann die Nachweisführung, dass der Beton ausreichende Mengen an Mikroluftporen enthält (und der Beton somit regelwerks- und bestellungskonform hergestellt wurde), über die Bestimmung der Luftporenkennwerte (s. Bild 9) erfolgen.

3.1 Nachweis der im Frischbeton enthaltenen Luft

Der Nachweis, dass im Frischbeton ausreichende Mengen an Mikroluftporen enthalten sind, erfolgt auf der Baustelle über das indirekte Verfahren zur Bestimmung des Gesamtluftgehalts nach DIN EN 12 350-7 im LP-Topf. Hierbei ist zu beachten, dass die im Frischbeton enthaltene Menge an Luft durch die Bedingungen bei der Betonherstellung, den Transport und den Einbau des Betons beeinflusst wird. Durch diese Einflüsse können die Luftgehalte in Frischbetonen



Bild 10: Reduzierte Menge an Mikroluftporen im Bereich der Betonoberfläche



Bild 11: Zementsteinabwitterungen oberhalb witterungsunbeständiger Gesteinskörner

- sowohl reduziert (durch den Transport des Frischbetons bei drehender Trommel, durch das Pumpen des Betons, durch eine zu intensive Verdichtung oder durch zu intensives Glätten der Betonoberfläche)
- als auch erhöht (verursacht durch nicht ausreichende Mischzeiten im Betonwerk) werden.

3.1.1 Reduzierung der Luftgehalte im Rahmen des Betontransports bzw. der Betoneinbringung

Soll die Wirksamkeit der luftporenhaltigen Zusatzmittel vollständig ausgenutzt wer-

den, so müssen die Betone nach der Dosierung des Luftporenbildners ausreichend lange und intensiv gemischt werden. Bei optimaler Mischzeit (diese ist abhängig von der Betonzusammensetzung, der Temperatur, der Konsistenz des Betons und der Qualität des Mischaggregats) erreicht der Anteil an eingebrachten Mikroluftporen ein Maximum (siehe roter Pfeil in Bild 12). Wird der Mischprozess über diesen optimalen Punkt hinaus fortgesetzt, reduziert sich der Anteil an Luft im Frischbeton wiederum [L19].

Diese Reduzierung des Luftgehalts tritt ein, wenn der Beton mit sachgerechter

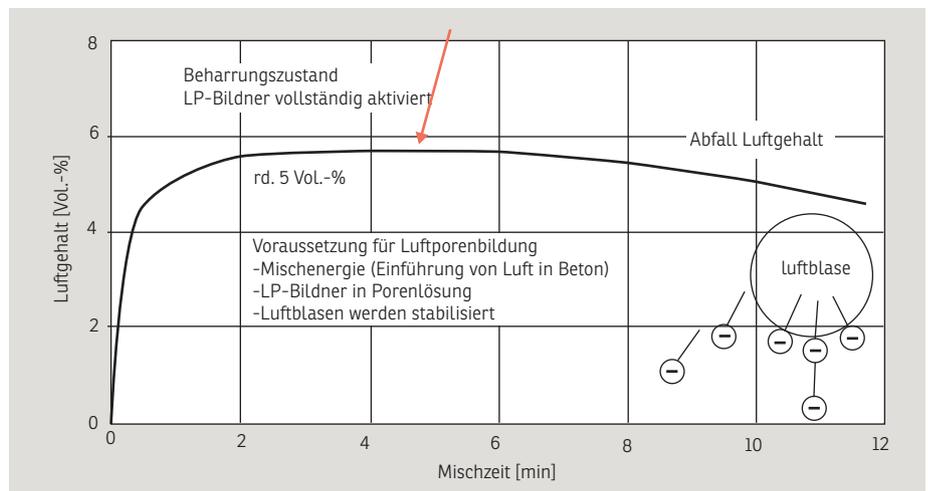


Bild 12: Luftgehalt in Abhängigkeit von der Mischzeit [19]



Bild 13: Zementsteinabwitterungen aufgrund intensiver Glättung des Betons

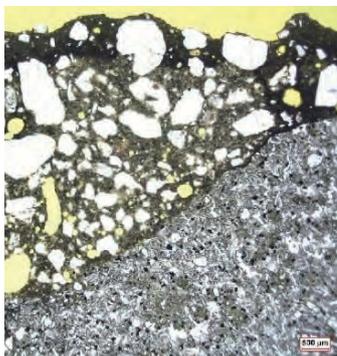
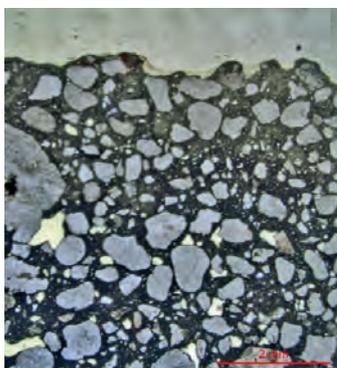


Bild 14: Abwitterungen in der Oberfläche aufgrund eines nicht sachgerecht ausgeführten Besenstrichs



Mischzeit hergestellt wurde und dem Beton in der Folge weitere Mischenergie z.B. durch das „Drehen der Trommel“ des Fahrmischers oder durch das Pumpen des Betons zugeführt wird. Man kann grob davon ausgehen, dass der Luftgehalt sachgerecht angemischter Betone beim Transport des Betons um rd. 0,5 % und beim Pumpen des Betons um rd. 1 % bis 2 % reduziert wird. Aufgrund dieser Einflüsse muss die Entnahme des Betons zur Bestimmung des Luftgehalts des Betons i.d.R. auch nach dem Schlauch und nicht vor der Pumpe erfolgen.

3.1.2 Reduzierung des Luftgehalts durch die Bearbeitung der Betonoberfläche
Der Zusammenhang zwischen dem Eintrag der Mischenergie und dem Luftgehalt im Frischbeton bleibt auch nach der Betonbringung erhalten. So zeigte sich im Rahmen von Schadensfällen aus der jüngeren Vergangenheit, dass die Menge an Mikroluftporen in der Oberfläche von intensiv geglätteten Betonen (Bild 13) oder auch bei ausgeführten Besenstrichen (Bild 14) häufig deutlich reduziert war, wodurch in den betroffenen Flächen Frost-/Tausalz-Schäden resultierten.

All diesen Schäden ist gemein, dass zur Herstellung der Bauteile luftporenhaltige Betone eingesetzt wurden, bei denen die Menge an Mikroluftporen in der Betonoberfläche durch die Oberflächenbearbeitung des Betons reduziert wurde.

3.1.3 Erhöhung der Luftgehalte durch zu kurze Mischzeiten im Rahmen der Betonherstellung
Wird dem luftporenhaltigen Beton im Rahmen der Betonherstellung aus Kosten- und/oder Zeitgründen keine ausreichende Mischenergie zugeführt, so verbleibt ein deutliches Nachaktivierungspotenzial des im Beton enthaltenen Luftporenbildners. Wird diesem Beton im Nachhinein neuerlich Mischenergie zugeführt (durch den Transport, das Pumpen oder die Verdichtung), so wird der bis dahin nicht aufgeschlossene Luftporenbildner aktiviert und es resultieren deutlich

erhöhte Luftgehalte im Beton. Dieser Vorgang wurde ausführlich durch Eickschen und Müller untersucht. Der von Eickschen und Müller ermittelte Zusammenhang zwischen dem Nachaktivierungspotenzial und der Mischzeit [19] ist in Bild 15 dargestellt.

Nach Eickschen und Müller ist das Nachaktivierungspotenzial bei künstlich hergestellten Luftporenbildnern deutlich stärker ausgeprägt als bei natürlichen LP-Bildnern auf Wurzelholzbasis.

3.2 Nachweis der im Festbeton enthaltenen Mikroluftporengehalte

3.2.1 Luftporenkennwerte

Stehen keine Ergebnisse entsprechender Prüfungen zur Bestimmung des Luftgehalts am Frischbeton zur Verfügung oder bestehen Zweifel daran, dass sich im Festbeton kein geeignetes Mikroluftporensystem ausgebildet hat, so kann die nachträgliche Beurteilung des Frost-Tausalz-Widerstands des Betons nur durch die Bestimmung der Luftporenkennwerte oder durch nachträgliche Frost-Tausalz-Versuche (s. Abschnitt 5.1 in Teil 2) an Bauwerksproben erfolgen.

Gemäß dem FGSV-Merkblatt „Herstellung und Verarbeitung von Luftporenbeton“ sind die so genannte Luftporenkennwerte (Gesamtluftgehalt, Anteil an Mikroluftporen mit einem Durchmesser < 300 µm und Abstandsfaktor zwischen den Mikroluftporen) mikroskopisch zu ermitteln. Auf Basis der Luftporenkennwerte ist die Frage zu beantworten, ob das Betonwerk einen Luftporenbeton (nachfolgend als LP-Beton bezeichnet) oder einen Beton ohne ausreichenden Gehalt an Mikroluftporen geliefert hat. Mittels dieser Untersuchung kann demnach die Frage beantwortet werden, ob seitens des Betonwerks ein Beton geliefert wurde, der die Anforderungen an Frost-Tausalz-beständige Betone der Expositions-klasse XF4 erfüllt.

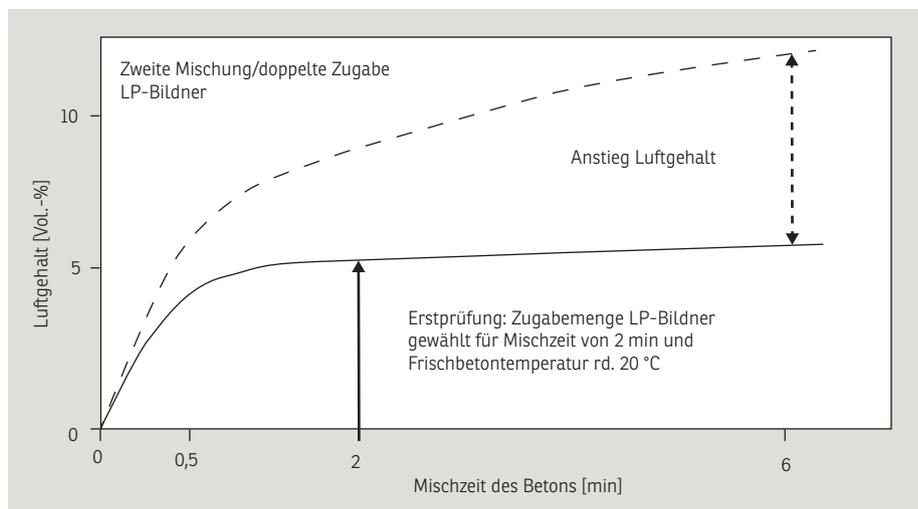


Bild 15: Nachaktivierungspotenzial des im Beton enthaltenen Luftporenbildners [19]

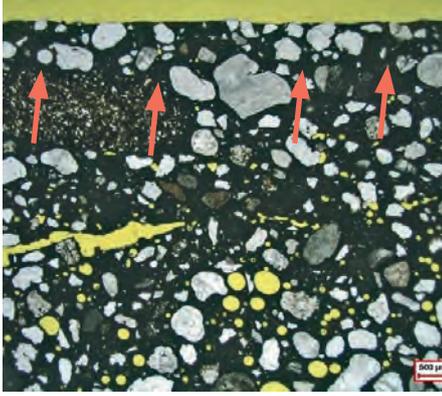


Bild 16: Luftporenabreicherung in der Betonoberfläche

Werden im Rahmen dieser Prüfung regelwerkskonforme Luftporenkennwerte bestimmt, so gehen die Auftraggeber üblicherweise davon aus, dass der Beton auch

in der Betonoberfläche einen ausreichend hohen Widerstand gegenüber Frost-Tausalz-Angriffen aufweist und dass es sich bei dem vorliegenden Schaden somit auch nicht um einen Frost-Tausalz-Schaden handeln kann.

Bei genauer Betrachtung des Prüfverfahrens zeigt sich jedoch, dass die Mikroluftgehalte erst ab einem Abstand von 6 mm von der Oberfläche aus und dann in regelmäßigen Abständen von 6 mm gemessen werden. Demnach kann mit diesem Verfahren nur festgestellt werden, ob das Betonwerk einen normen- bzw. bestellungskonformen LP-Beton geliefert hat und dass das Mikroluftporensystem des Betons in oberflächenferneren Bereichen die Anforderungen des Technischen Regelwerks erfüllt.

Anders formuliert bedeutet dies, dass Zementsteinabwitterungen auch dann durch die Einwirkung von Frost-Tausalz verursacht werden können, wenn der Beton aus-

reichende Luftporenkennwerte aufweist, die Mikroluft in der Betonoberfläche aber abgereichert ist.

3.2.2 Luftporenabreicherung

Wie in Abschnitt 2.1.2 ausgeführt wurde, können die Mikroluftgehalte in der Betonoberfläche durch den Eintrag von Verdichtungsenergie (z.B. durch intensives Glätten) zum Teil deutlich reduziert werden. Eine derartige Reduzierung des Anteils an Mikroluftporen in der Betonoberfläche ist aber nicht durch die Bestimmung der Luftporenkennwerte nachweisbar (s. Abschnitt 3.2.1). Eine derartige Abreicherung an Mikroluftporen lässt sich stattdessen nur durch dünnschliffmikroskopische Untersuchungen nachweisen (siehe beispielsweise rote Pfeile in Bild 16).

Teil 2 erscheint in beton 1+2/2024

Alles aus einer Hand

Premium Systemlösungen und professioneller Service für Betonbohr- und -sägebetriebe

