

Forschungsbericht
des Instituts für Materialwissenschaft

Einfluss der Alterung auf die innere und äußere
Schädigung von Hochleistungsbeton unter
Frost- und Frost-Tausalzangriff

Susanne Palecki





Einfluss der Alterung auf die innere und äußere
Schädigung von Hochleistungsbeton unter
Frost- und Frost-Tausalzangriff



Forschungsbericht
des Instituts für Materialwissenschaft

Einfluss der Alterung auf die innere und äußere
Schädigung von Hochleistungsbeton unter
Frost- und Frost-Tausalzangriff

Dr.-Ing. Susanne Palecki

Universität Duisburg-Essen
Fakultät für Ingenieurwissenschaften
Institut für Materialwissenschaft
Prof. Dr. rer. nat. habil. Doru C. Lupascu



Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

1. Aufl. - Göttingen: Cuvillier, 2016

© CUVILLIER VERLAG, Göttingen 2016

Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen

Telefon: 0551-54724-0

Telefax: 0551-54724-21

www.cuvillier.de

Alle Rechte vorbehalten. Ohne ausdrückliche Genehmigung des Verlages ist es nicht gestattet, das Buch oder Teile daraus auf fotomechanischem Weg (Fotokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen.

1. Auflage, 2016

Gedruckt auf umweltfreundlichem, säurefreiem Papier aus nachhaltiger Forstwirtschaft.

ISBN 978-3-7369-9258-0

eISBN 978-3-7369-8258-1

VORWORT

Beton ist in der Praxis verschiedenen Umwelteinflüssen ausgesetzt, die die Dauerhaftigkeit unterschiedlich stark beeinträchtigen können. Die Gewährleistung eines ausreichenden Widerstandes gegenüber Frost- bzw. Frost-Tausalzangriff ist ein Faktor für die Errichtung von Bauwerken mit langer Lebensdauer, weshalb die Überprüfung der Eignung einer Betonmischung unter Frost-Tausalz Exposition notwendig ist. Für eine entsprechende Simulation eines derartigen Angriffs unter Laborbedingungen stehen verschiedene Prüfverfahren zur Verfügung. Als zuverlässige und repräsentative Methode hat sich der CDF/ CIF-Test erwiesen, der, wie auch andere Prüfverfahren aus Konformitätsgründen ein Prüfalter von 28 Tagen vorschreibt, obwohl in der Praxis Bauteile häufig erst zu einem späteren Zeitpunkt Frost-Tau-Wechseln ausgesetzt sind. Aufgrund bisheriger Erfahrung zeigt sich insbesondere bei Betonen mit Zusatzstoffen, wie sie z.B. bei hochfesten Betonen eingesetzt werden, eine Beeinflussung der Prüfergebnisse vom Zeitpunkt der Frost-Tausalzprüfung. Während bei Normalbetonen Literaturangaben zufolge häufig von einer positiven Beeinflussung des Prüfalters auf den Frost- und Frost-Tausalzwiderstand berichtet werden konnte, belegen eigene Untersuchungen an Hochleistungsbeton, dass sich sowohl die äußere wie auch innere Schädigung mit zunehmendem Prüfalter negativ verändert. Im Rahmen des von der Deutschen Forschungsgesellschaft geförderten Forschungsprojektes sollte daher am Institut für Materialwissenschaft der Universität Duisburg-Essen systematisch überprüft werden, wie sich die Schädigungsparameter und Transportmechanismen in Abhängigkeit der Zeit verändern.

Der vorliegende Forschungsbericht fasst in Auszügen die wichtigsten Erkenntnisse zusammen. Das Projekt hatte ursprünglich eine Laufzeit von 30 Monaten. In die Untersuchungen konnten aber zusätzlich noch verfügbare Proben aus dem von 2001 bis 2004 laufenden EU Projekt CONLIFE mit einbezogen werden. Zusammen mit den im Rahmen des Projektes neu hergestellten 19 Betonserien umfasste das Prüfprogramm somit einen erheblichen Prüfumfang mit einer Vielzahl an Variationsparametern. Dementsprechend ist die gewonnene Datenbasis sehr umfangreich und in Bezug auf eine Trendanalyse einzelner Parameter sehr aufwändig und zeitintensiv. Die experimentell gewonnenen Daten sollen in Zukunft für eine weitere Modellierung des Alterungssatzes im Rahmen von Dauerhaftigkeitskonzepten als Basis dienen und können theorieorientierte Ansätze stützen.

Das Forschungsvorhaben wurde dankenswerterweise durch Mittel der Deutschen Forschungsgesellschaft finanziert. Die Verfasserin bedankt sich außerdem bei den zuständigen Labormitarbeitern Herrn Dubray, Herrn Nawrath und Herrn Gäbel für die tatkräftige Unterstützung sowie dem Leiter des Instituts für Materialwissenschaft Herrn Prof. D. C. Lupascu für die Möglichkeit der Durchführung der Arbeiten.

Essen, Oktober 2015

S. Palecki



INHALT

Vorwort	5
1. Grundlagen	9
1.1 Schadensmechanismen infolge Frost-/ Frost-Tausalzbelastung	9
1.2 Frostprüfverfahren	10
1.3 Untersuchungen zum Einfluss der Betonalterung	10
1.4 Einflüsse aus chemischem und autogenem Schwinden.....	12
1.5 Problemstellung.....	13
2. Ergebnisse.....	14
2.1 Prüfprogramm	14
2.2 Zementsteinuntersuchungen	16
2.3 Betonuntersuchungen	24
2.3.1 Materialien.....	25
2.3.2 Frischbetonkennwerte.....	26
2.3.3 Festbetondaten.....	26
2.4 Freilagerung der Proben.....	31
2.4.1 Messung des Elektrolytwiderstandes.....	34
2.4.2 Gefügeveränderungen infolge Freilagerung.....	39
2.4.3 Schadensbeurteilung infolge Frost-Tau Exposition	41
2.4.4 Messung der Karbonatisierung ausgelagerter Proben.....	46
2.5 Untersuchung der Laborbetone	48
2.5.1 Messung des elektrolytwiderstandes zur Bestimmung des Austrocknungsverhaltens.....	48
2.5.2 Gefügeveränderungen	52
2.5.3 Bestimmung der Karbonatisierung.....	62
2.5.3 Frost-und Frost-Tausalzwiderstand	66
2.5.5 Bestimmung des Chloridgehalts	92
2.5.6 Korrelation der CDF/ CIF Ergebnisse.....	94
Zusammenfassung.....	104
Ausblick.....	107
Literaturverzeichnis.....	108



1. GRUNDLAGEN

1.1 SCHADENSMECHANISMEN INFOLGE FROST-/ FROST-TAUSALZBELASTUNG

Ist Beton einer Frost- oder Frost-Tausalzbelastung ausgesetzt kann es zu einer äußeren aber auch inneren Schädigung des Betongefüges kommen. Eine äußere Schädigung zeigt sich in Form von Abwitterungen der obersten Zementsteinschicht, während für eine innere Gefügezerstörung die Bildung von Mikrorissen charakteristisch ist. Als Folge dessen werden die mechanischen und physikalischen Eigenschaften des Betonbauwerkes und damit dessen Standsicherheit nachhaltig beeinträchtigt. Beide Schadensarten müssen nicht miteinander gekoppelt und auch nicht gleich stark auftreten. Häufig dominiert beim Frost-Tausalzangriff allerdings eine äußere Schädigung, wobei auch je nach Betonqualität eine innere Schädigung unterschiedlich stark ausgeprägt sein kann.

Bei der Frostschädigung d.h. der *inneren Gefügezerstörung* handelt es sich im Wesentlichen um einen dynamischen Prozess, der im noch nicht kritisch gesättigten Beton beginnt. Für die Schädigung ist die Anwesenheit von Feuchtigkeit notwendig, ohne welche der Beton nicht frostgefährdet ist. Die Flüssigkeitsaufnahme erfolgt zunächst kapillar und bewirkt unter isothermischen Bedingungen eine maximale Sättigung des Porenraumes von 90%. D.h. durch das kapillare Saugen alleine kommt es i.d.R. nicht zu einer Überschreitung der kritischen Sättigung und damit nicht zu einer Gefügeschädigung infolge der 9%-igen Volumenausdehnung des Eises. Grund für eine Gefügezerstörung ist die zyklische Belastung, wie sie durch Frost-Tau-Wechsel hervorgerufen wird. Diese wirken wie eine Pumpe und sättigen den Beton mit jedem Frost-Tau-Wechsel bis zum Erreichen einer kritischen Sättigung. Letzteres hängt von der Betonzusammensetzung und vor allem der Porosität ab. Das Verhältnis von nicht gefrierbarem Wasser in Gelporen zu gefrierbarem Wasser, das in Kapillarporen vorliegt, sowie der Gehalt an Grobporen sind dabei ganz entscheidend für die Frostbeständigkeit des Betons. Der Prozess der mit der Sättigung des Betons verbunden ist wird durch das Mikroislinsemodell von SETZER beschrieben [S3],[S5]. Frost-Tau-Wechsel funktionieren dementsprechend wie eine Mikropumpe. Daher ist für die Lebensdauer einer Betonmischung unter einer Frostbelastung vor allem die Sättigungsgeschwindigkeit von Bedeutung, welche ebenfalls von der Betonzusammensetzung, der Porosität und der Porenstruktur abhängig ist.

Eine *äußere Schädigung* charakterisiert sich durch Abwitterung der oberflächennahen Zementsteinschichten, teilweise auch durch kraterförmige Aussparungen über größeren Zuschlagskörnern. Die wichtigsten Einflussfaktoren für den Umfang des Frost-Tausalzschadens sind der Chloridgehalt und -gradient, die Wasseraufnahmefähigkeit,



der Feuchtegradient und der Wassersättigungsgrad, sowie die physikalische und chemische Aggressivität der Taumittelösung und selbstverständlich die Temperaturbelastung. Die Schädigungsmechanismen, die hier eine Rolle spielen sind in der Vergangenheit vielfältig untersucht worden. Während die innere Schädigung durch das Mikroislinsenmodell nach SETZER am besten beschrieben werden kann [S3],[S5], überlagern sich beim Frost-Tausalzangriff verschiedene Phänomene. Im Vordergrund stehen hier vor allem Phasenumwandlungen, wie sie von STARK und LUDWIG beschrieben wurden [L2] sowie Chromatographieeffekte.

1.2 FROSTPRÜFVERFAHREN

Mit Hilfe von Laborprüfverfahren können derartige Schädigungsformen im Zeitraffer simuliert und Aussagen über die Dauerhaftigkeit getroffen werden. Damit lässt sich die Eignung einer Betonmischung für eine Frost-Tausalz Exposition vor deren Einsatz in der Praxis überprüfen. Feldversuchen können darüber hinaus zusätzliche Hinweise zum Betonverhalten unter realen Bedingungen liefern, mit denen auch die Übertragbarkeit der Laborergebnisse untersucht werden können.

Der CDF-Test (*Capillary Suction of De-icing Chemicals and Freeze Thaw Test*) bzw. CIF-Test (*Capillary Suction, Internal Damage and Freeze Thaw Test*) mittels dem der Frost-/Frost-Taumittel-Widerstand bestimmt werden kann, garantiert einen einachsigen Wärme- und Feuchtetransport und realisiert somit die zuvor beschriebene Frostpumpe. Gleichzeitig kann die innere Gefügeschädigung mittels Ultraschalluntersuchung oder Resonanzfrequenzmessung (CIF-Test) bestimmt werden. Zur Beurteilung der inneren Schädigung wird der Abfall des dynamischen E-Moduls herangezogen. Als maßgebendes Abnahmekriterium ist die, je nach Anwendungsfall festzulegende Anzahl an Frost-Tau-Wechseln (FTW) bis zum Erreichen des Schädigungskriteriums definiert. Sämtliche Bewertungskriterien wurden auf Basis von Untersuchungsergebnissen und in Anlehnung an die DIN 1045 bzw. DIN EN 206 hergeleitet. Die Randbedingungen der Prüfverfahren sind explizit in den Prüfvorschriften festgelegt und basieren auf jahrelanger Forschungsarbeit [A2],[S7],[S8],[4.].

1.3 UNTERSUCHUNGEN ZUM EINFLUSS DER BETONALTERUNG

Der Zeitpunkt der Frost-Tausalzbeanspruchung variiert in der Praxis je nach Bauwerk erheblich. Sämtliche Prüfverfahren schreiben aber aus Konformitätsgründen ein Prüfalter von 28 Tagen vor, obwohl dies nicht immer praxisgerecht ist und auch bei bestehenden Bauwerken eine nachträgliche Bewertung des Frost-Tausalz-Widerstandes erschwert, da ein Vergleich nicht repräsentativ ist.

Hinsichtlich des Einflusses des Betonalters auf den Frost- und Frost-Tausalz widerstand, lassen sich in der Literatur unterschiedliche Aussagen finden. In Veröffentlichungen von PETERSSON wird von einem positiven Einfluss der Alterung auf den Frost-Tausalz widerstand von Beton berichtet [P5],[P6]. Die Arbeiten zeigen vergleichbare Ergebnisse von LP-Betonen, die nach 28 Tagen geprüft wurden und LP-freien Betonen, die erst später mittels Slab Test geprüft wurden, d.h. dass Betone auch ohne Luftporenbildner zu einem späteren Zeitpunkt frost-tausalzbeständig sein können, die es bei einer Prüfung nach 28 Tagen nicht waren. In seinen Arbeiten zieht PETERSSON den Schluss, dass bei Bauwerken, die erst zu einem späteren Zeitpunkt einer XF4 Exposition ausgesetzt sind, auch LP freie Betone eingesetzt werden können, obwohl dies nach EN 206 nicht zulässig ist. Nach Arbeiten von SCHIEBL wird diese Behauptung wieder relativiert. Im Rahmen eines Forschungsprojektes [B3], konnte zwar auch eine Verbesserung des Abwitterungsverhaltens nach längerer Lagerung festgestellt werden, allerdings nicht in der Größenordnung, wie sie PETERSSON beschreibt. Aufgrund dessen kann nicht uneingeschränkt eine Anwendung LP-Mittel freier Betone, die erst später einer Frost-Tausalz Exposition ausgesetzt sind, empfohlen werden. Bei Untersuchungen von HARTMANN, die im Zuge der Entwicklung des CDF-Prüfverfahrens an älteren Betonproben durchgeführt wurden, zeigte sich ein kontroverser Trend im Vergleich zu den bereits erwähnten Arbeiten [H1]. HARTMANN und AUBERG fanden im Vergleich zu 28 Tage geprüften Betonen nach längerer Normlagerung der Proben höhere Abwitterungsmengen [H1],[A2]. Als Grund wurde der Einfluss der Karbonatisierung genannt.

Die obigen Aussagen beschränken sich aber lediglich auf das Abwitterungsverhalten normalfester Betone und berücksichtigen nicht die innere Gefügeschädigung. Da sich infolge längerer Lagerung bzw. höherem Betonalter die Struktur des Gefüges und damit auch die Transporteigenschaften signifikant verändern können, spielt eine mögliche innere Gefügeschädigung eine wichtige Rolle bei der Beschreibung des Alterungseinflusses auf die Dauerhaftigkeit von Beton. Bei älteren Betonproben kommt es in erster Linie zu einer verstärkten Austrocknung der Randbereiche. Dadurch tritt bei Wasserlagerung eine höhere kapillare Feuchteaufnahme ein.

FAGERLUND,[F1],[F2] berichtete in seinen Untersuchungen mittels *Differential Scanning Calorimetrie* (DSC) von einer mit der Zeit zunehmenden Erhöhung der gefrierbaren Wassermenge. CWIRZEN und PENTTLA fanden in ihren Untersuchungen an silikahaltigen hochfesten Betonen heraus, dass sich die chemische Zusammensetzung der Kontaktzone nach längerer Lagerung verändert und die Rissbreiten innerhalb der Übergangzone infolge Selbstaustrocknung zunehmen [C2]. Demnach fanden sie bei Proben nach einem Jahr Lagerung zwar eine Abnahme der Abwitterungsmengen, die innere Schädigung war bei silikahaltigen Betonen mit w/b -Werten > 0.30 dagegen gegenüber der 28 Tage Prüfung deutlich erhöht [C2]. Im Rahmen eines Forschungs-