

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 Taumittellösung 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-Tausalzwiderstand, lassen sich in der Literatur unterschiedliche Aussagen finden. In Veröffentlichungen von PETERSSON wird von einem positiven Einfluss der Alterung auf den Frost-Tausalzwiderstand 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 Übergangszone infolge Selbst austrocknung 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-



projektes an der Universität Weimar zu selbstverdichtendem Betonen konnte ebenfalls ein negativer Einfluss bei längerer Luftlagerung auf den Frostwiderstand beobachtet werden, was hauptsächlich durch die stärkere Austrocknung der Betone bedingt war [S11]. BRAMESHUBER und SPÖREL fanden in Untersuchungen an ausgelagerten Betonproben unter XF3 Exposition hingegen einen mit der Zeit zunehmenden Frostwiderstand. In ihren Messungen wurden sowohl CEM III-Betone unter den üblichen CIF-Laborbedingungen geprüft als auch 2 Jahre in der Wasserwechselzone eines Schleusenbauwerkes gelagert und anschließend erneut mittels CIF-Test untersucht [B2]. Während bei der 28 Tage CIF-Prüfung die Prüfkriterien nicht erreicht wurden, konnte nach 2 Jahren Lagerung in der Wasserwechselzone eine deutliche Verbesserung des Frostwiderstandes an den geprüften Bohrkernen ermittelt werden. Zu beachten ist hierbei das Wasserangebot der Proben während der Freilagerung sowie die Probekörperabmessung. Aussagen zum Langzeitverhalten können derzeit noch nicht getroffen werden.

Untersuchungen im Rahmen des EU Forschungsprojektes CONLIFE [C1] bei denen sowohl Labor- als auch Feldversuche an älteren hochfesten Betonproben durchgeführt wurden, zeigte sich zum einen eine Verschlechterung des reinen Frostwiderstandes, insbesondere bei silikahaltigen Mischungen, als auch eine Verbesserung des Abwitterungsverhaltens unter Frost-Tausalzbelastung. Es konnte bei älteren Betonen (180 Tage) zudem eine Verdichtung der Porenstruktur sowie Zunahme des autogenen Schwindens festgestellt werden.

1.4 EINFLÜSSE AUS CHEMISCHEM UND AUTOGENEM SCHWINDEN

Wie von verschiedenen Autoren berichtet, verändert sich in Abhängigkeit der Zeit auch der Feuchtegehalt in den zunächst luftgefüllten Schrumpfporen. In [F1] bzw. [F2] wird angenommen, dass bei längerer Lagerung der positive Effekt der Schrumpfporen auf den Frostwiderstand verloren geht, da sich diese mit Wasser oder Tausalzlösung füllen können. Zusätzlicher Expansionsraum für die Eisexpansion oder die bei Luftporenbetonen zu beobachtende Pufferwirkung wären nicht mehr gegeben. FAGERLUND beschreibt dieses Verhalten mit einer sogenannten Inkubationszeit der Schrumpfporen [F1]. Allerdings wird auch erwähnt, dass bei extrem niedrigen w/z-Werten dieser Effekt durch die Dichtigkeit der Matrix wieder verloren gehen kann. Je nach Umgebungsbedingungen konnten in Untersuchungen nach PERSSON und NILSSON mit der Zeit zwar eine Austrocknung des Betonkerns festgestellt werden, die Randzonen wiesen dagegen deutlich höhere Sättigungsgrade auf. Hier überlagern sich Einflüsse aus Umgebungsbedingungen und Selbstaustrocknung. Je nachdem wie hoch die Umgebungsfeuchte ist, füllen sich die Poren in den Randzonen mit Wasser oder Hydratationsprodukten [P4]. In der Literatur wird auch in diesem Zusammenhang

erneut der enorme Einfluss von Silika auf das Langzeitverhalten erwähnt. In Schwindversuchen variierten Schwindverlauf und Endschwindmaß in Abhängigkeit des Silikagehaltes enorm. Hierbei ist natürlich auch der Grad der inneren Selbstaus-trocknung entscheidend für das autogene Schwinden. PERSSON konnte in seinen Untersuchungen erst nach einem Jahr ein Gleichgewicht zwischen Betonkern und der Umgebung feststellen sowie nachträgliche puzzolanische Reaktionen [P4]. Selbstverständlich besteht hier ein direkter Zusammenhang zwischen der Dichtigkeit der Matrix und den Umgebungsbedingungen.

1.5 PROBLEMSTELLUNG

In den üblichen Frostprüfverfahren ist aus Konformitätsgründen ein Prüfalter von 28 Tagen vorgeschrieben. Damit kann bei einer Beurteilung des Frost-Tausalz widerstandes bei neu hergestellten Betonproben reproduzierbar deren Eignung zu einem festgelegten Zeitpunkt ermittelt werden. Häufig ist Beton in der Praxis jedoch erst zu einem späteren Zeitpunkt einer Frost- und Frost-Tausalzbelastung ausgesetzt. Zudem wird regelmäßig auch bei bestehenden Bauwerken eine nachträgliche Bewertung des Frostwiderstandes gefordert. Der Einfluss des Betonalters auf die Ergebnisse der Frost- und Frost-Tausalzprüfung ist bislang nur ansatzweise behandelt worden. Die in der Vergangenheit durchgeführten Untersuchungen zum Einfluss der Alterung auf den Frost- und Frost-Tausalzwiderstand von Beton beschränken sich lediglich auf die Bestimmung der äußeren Schädigung und schließen nur Normalbetone ein. Gerade aber die Betonstruktur, insbesondere die Porenverteilung wird durch die Alterung signifikant beeinflusst, was zur Folge hat, dass sich auch die Transporteigenschaften verändern. Vor allem bei Verwendung von Zusatzstoffen sind hier signifikante Veränderungen zu erwarten.

Für die Beschreibung der Schadensmechanismen und Transporteigenschaften in Abhängigkeit des Betonalters und der Umgebungsbedingungen sind neben der systematischen Prüfung des Frost- und Frost-Tausalzwiderstandes von hoch- und normalfesten Betonen auch umfassende Untersuchungen der Gefügestruktur, wie z.B. Porenverteilung, Feuchtegradienten, Schwindverhalten und Karbonatisierungseffekte von wesentlicher Bedeutung.

2. ERGEBNISSE

2.1 PRÜFPROGRAMM

Das Prüfprogramm enthielt neben der Bestimmung der Dauerhaftigkeitsparameter Abwitterung und innerer Schädigung die Bestimmung der Veränderung verschiedener materialspezifischer Kennwerte. Die Messmethoden und Prüfverfahren wurden dabei an insgesamt 19 unterschiedlichen Betonmischungen mit Variation der Zementart, des w/b-Wertes und der Zugabe an Zusatzstoffen durchgeführt. Die nachfolgende Abbildung zeigt eine Übersicht der verschiedenen Mischungszusammensetzungen. Hierbei wurde der Bindemittelgehalt je nach w/b-Wert konstant gehalten und ein Austausch von Zement durch Zusatzstoffe im Verhältnis 1:1 vorgenommen. Bei den CEM III-Betonen wurde aus Kapazitäts- und Zeitgründen die Variation des w/b-Wertes auf ein Minimum reduziert.

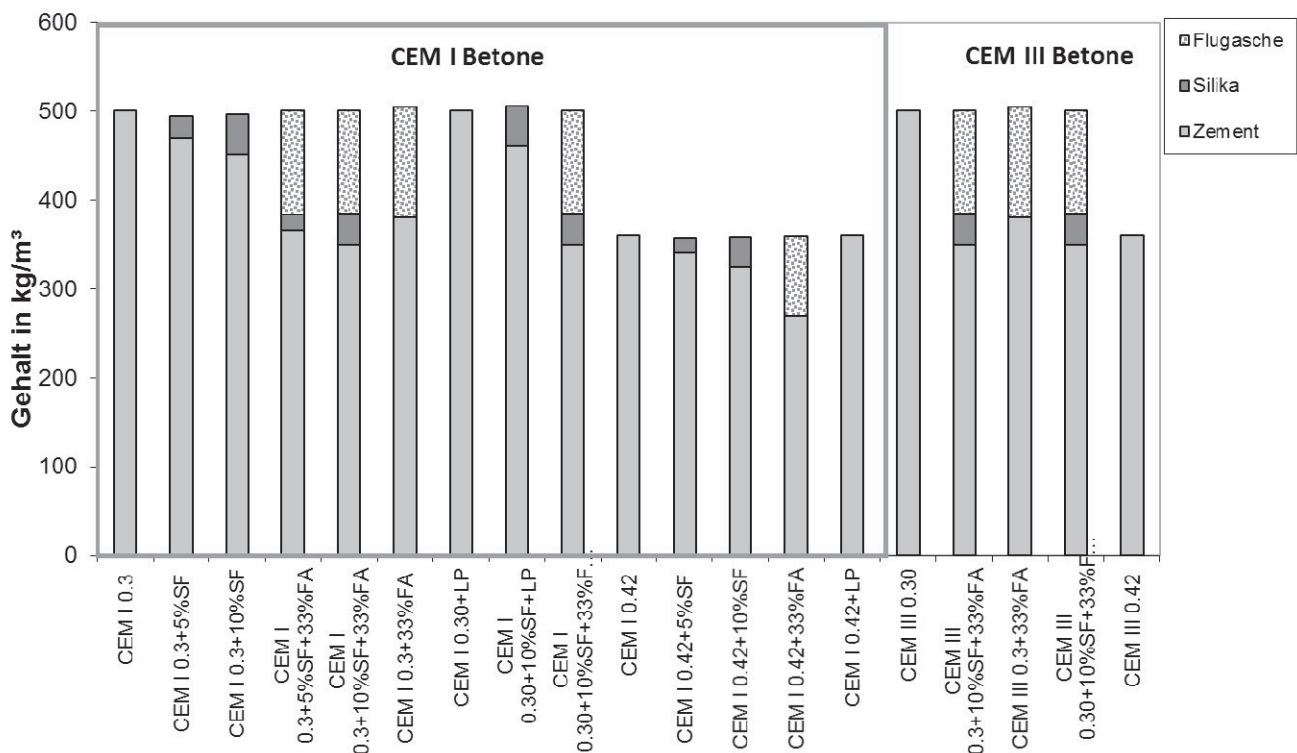


Abbildung 1: Zusammensetzung der neu hergestellten Betonserien

Grundsätzlich gliederte sich das Prüfprogramm in die Abschnitte Labor- und Feldversuche. Abgesehen davon erfolgte eine Unterscheidung der Untersuchungen an neu hergestellten Betonmischungen mit einem Prüfalter von 28 Tagen bis zu 3 Jahren sowie älterer Betonproben (8-9 Jahre) ähnlicher Rezeptur. Eine Übersicht der Variationen und Angaben zu den Prüfzeitpunkten enthält die folgende Grafik, eine Zusammenfassung der einzelnen Messmethoden Tabelle 1.