

Zusammenfassung der Promotionsschrift

**Frost-Tausalz-Angriff auf Beton – Neue Erkenntnisse zum  
Schadensmechanismus**

zur Erlangung des akademischen Grades  
Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

an der Fakultät Bauingenieurwesen  
der Bauhaus-Universität Weimar

vorgelegt von

**Matthias Müller**

Mentor:  
Prof. Dr.-Ing. Horst-Michael Ludwig

Status des Doktoranden:  
intern

November 2020

## **Problemstellung und Zielsetzung der Arbeit**

1. In Mitteleuropa sind der Frost- und Frost-Tausalz-Angriff relevante Expositionen, die bei der Rezeptierung von Betonen beachtet werden müssen. Bislang nutzt man zum Erreichen eines entsprechenden Materialwiderstandes das deskriptive Prinzip. Dabei werden auf der Basis langjähriger Erfahrungswerte in Abhängigkeit von der Intensität des Angriffs normative Vorgaben für die Betonzusammensetzung gemacht.
2. Die deskriptive Vorgehensweise wird zukünftig nicht mehr zielführend sein. Gründe hierfür sind neuartige Zement- und Betonzusammensetzungen, die aufgrund der Klima- und Nachhaltigkeitsdebatte sehr dynamisch den Markt erobern werden und für die noch kein entsprechender Erfahrungsschatz vorliegt. Für entsprechende Prognosen benötigt man hier neben einem funktionierenden Prüfverfahren auch grundlegende Kenntnisse über den Mechanismus des Angriffs. Des Weiteren wird die Dauerhaftigkeit zukünftig im Rahmen von Lebensdauerbetrachtungen bemessen werden. Für den dafür notwendigen zeitaufgelösten Schädigungsverlauf werden lastbare Schadensmodelle benötigt.
3. Der aktuelle Forschungsstand zum Frost-Tausalz-Angriff ist geprägt von widersprüchlichen Theorien zum Schadensmechanismus. Für ein vertieftes Verständnis der materialspezifischen Auswirkungen eines Frost-Tausalz-Angriffs müssen die Schadensvorgänge, die diesem Angriff zu Grunde liegen, besser verstanden und in ein widerspruchsfreies Modell überführt werden. Auf dieser Basis können dann Strategien zur Schadensvorhersage und zur Schadensvermeidung entwickelt werden.
4. Ziel dieser Arbeit war es, geeignete Modelle zur Beschreibung des Frost-Tausalz-Angriffs auf Beton zu identifizieren und experimentell zu überprüfen. Auf der Basis der gewonnenen Erkenntnisse sollten dann entsprechende Modellvorstellungen so weiterentwickelt werden, dass eine widerspruchsfreie Beschreibung der entsprechenden Vorgänge ermöglicht wird.

## **Aktueller Forschungsstand**

5. Der Widerstand von Beton gegen einen Frost- und Frost-Tausalz-Angriff wird maßgeblich, aber nicht ausschließlich, von seinem Porengefüge beeinflusst. Das Gefrierverhalten von Wasser im Porengefüge des Betons unterscheidet sich dabei grundlegend vom Gefrierverhalten makroskopischen Wassers. Aufgrund der Wirkung von Oberflächenkräften erstreckt sich das Gefrieren hier über einen sehr weiten Temperaturbereich. Bei einem Frostangriff liegt Wasser im Beton daher in verschiedenen Aggregatzuständen gleichzeitig vor. Dies führt zu komplexen Transportphänomenen im Porengefüge, die zu einer Frostschädigung führen können.
6. Die Schadensvorgänge bei einem reinen Frostangriff auf Beton werden überwiegend gut verstanden. Vorrangig tritt dabei eine tiefergehende Schädigung des Betongefüges durch Mikrorisse auf, die sogenannte innere Schädigung. Im deutschsprachigen Raum ist das Modell der „Mikroelisinsenpumpe“ von Setzer für die Beschreibung der betreffenden Vorgänge weitgehend anerkannt.
7. In Anwesenheit von Tausalzen werden die Schadensvorgänge deutlich komplexer. Als Schadensbild treten vorrangig oberflächliche Abwitterungen auf. Die Ursachen für die Entstehung dieser Abwitterungen werden kontrovers diskutiert. Sinnvolle, aber stark unterschiedliche Ansätze zur plausiblen Beschreibung der Vorgänge liefern bislang nur zwei Modelle: das „Glue Spall Modell“ und das „Cryogenic Suction

Modell“. Die Modelle bilden den Ausgangspunkt für die Untersuchungen im experimentellen Teil dieser Arbeit und die abgeleiteten eigenen Modellvorstellungen.

## **Materialien und Methoden**

8. Die Untersuchungen zu den Schadensmodellen erfolgten mit unterschiedlichen Abstraktionsgraden vom Beton bis hin zum Zementstein. Als Materialbasis wurden ein Portlandzement, ein Hochofenzement sowie ein Portlandkalksteinzement verwendet. Innerhalb der Betonrezepturen wurden insbesondere die Wasser/Zement-Werte variiert.
9. Zur grundlegenden Charakterisierung der Ausgangsstoffe wurden chemisch-mineralogische und granulometrische Untersuchungen sowie Oberflächenanalysen durchgeführt. Zudem wurden die Anwendungseigenschaften der Zemente, der Gesteinskörnungen sowie der daraus hergestellten Betone entsprechend der einschlägigen Normen und Richtlinien geprüft.
10. Im ersten Teil des Untersuchungsprogrammes wurde zunächst der Frost-Tausalz-Widerstand der unterschiedlichen Betone ermittelt. Die Frost-Tausalz-Prüfungen erfolgten mittels CDF-Verfahren. Das CDF-Verfahren wurde dabei gezielt modifiziert, um Annahmen des Glue Spall Modells zu überprüfen.
11. Im zweiten Teil des Untersuchungsprogramms wurden Versuche mit der Zielstellung durchgeführt, die Ergebnisse der Betonversuche auf der Mikro-/ Mesoebene zu interpretieren und erklärbar zu machen. Die Untersuchungen erfolgten überwiegend am Zementstein. Als zentrale Methode wurde hier die dynamische Tieftemperatur-Differenzkalorimetrie (LTDSC) verwendet. Mit der LTDSC wurde das Gefrierverhalten des Zementsteins analysiert und das Eisvolumen in den vernetzten Kapillarporen quantifiziert.

## **Ergebnisse**

12. In den Untersuchungen erwiesen sich einige der Modellannahmen, die im Glue Spall Modell getroffen wurden, als richtig. So konnte die prognostizierte Abhängigkeit der Abwitterungsintensität von der Eisschichtdicke in der Frost-Tausalz-Prüfung bestätigt werden. Ein zentraler Punkt des Modells erwies sich jedoch als nichtzutreffend. Das Glue Spall Modell führt die Entstehung von Abwitterungen auf eine mechanische Schädigung der Betonoberfläche durch eine anhaftende Eisschicht zurück. In den CDF-Versuchen wurde jedoch festgestellt, dass nennenswerte Abwitterungen auch bei so hohen Tausalzkonzentrationen hervorgerufen werden, bei denen eine mechanische Schädigung des Betons durch eine Eisschicht ausgeschlossen werden kann. Das Glue Spall Modell spiegelt somit die Vorgänge, die während einer Frost-Tausalz-Belastung im Beton stattfinden, nur unzureichend wider und wurde als Basis für ein modifiziertes Schadensmodell verworfen.
13. Das Cryogenic Suction Modell basiert auf dem eutektischen Verhalten von Tausalzlösungen, die im gefrorenen Zustand immer als Mischung aus Wassereis und ungefrorener, hochkonzentrierter Tausalzlösung vorliegen, solange die Eutektikumstemperatur (-21,3 °C für NaCl-Lösungen) nicht unterschritten wird. Bei einem Frost-Tausalz-Angriff soll ein Transport der ungefrorenen Tausalzlösung aus dem salzhaltigen Eis zu den Eislinsen, die im Beton vorliegen, erfolgen. Dieser Prozess wird als kryogenes Saugen bezeichnet. Er soll zu einem starken Eiwachstum in den oberflächennahen Poren führen und die Entstehung von Abwitterungen hervorrufen.

14. Ergebnisse von LTDSC-Messungen unter Zufuhr von hochkonzentrierten Tausalzlösungen bestätigten, dass diese Lösungen beim Gefrieren vom Zementstein aufgenommen werden und zu einem verstärkten Eiwachstum führen. Damit wurde der grundlegende Mechanismus des Cryogenic Suction Modells bestätigt.
15. Die Zunahme des Eisvolumens durch das kryogene Saugen wird von mehreren materialspezifischen Eigenschaften beeinflusst. Als maßgebliche Einflussfaktoren wurden die vorhandene vernetzte Kapillarporosität sowie das Chloridbindungsvermögen des Zementsteins identifiziert.
16. Im Cryogenic Suction Modell wird nicht berücksichtigt, dass auch andere Sättigungsprozesse zur Aufnahme von Tausalzlösung in das Betongefüge führen können. So kann allein durch den Vorgang des kryogenen Saugens nicht hinreichend begründet werden, warum bei moderaten Tausalzkonzentrationen im Bereich von 0,5 bis 3 M.-% die stärksten Abwitterungen im Frost-Tausalz-Prüfverfahren auftreten.
17. Um zu einer durchgehend plausiblen Beschreibung der Vorgänge während einer Frost-Tausalz-Belastung zu kommen, muss das Cryogenic Suction Modell durch den Sättigungsvorgang erweitert werden, der durch die Mikroeilslinsenpumpe initiiert wird. Das kombinierte Modell erfasst damit sowohl die intensive Sättigung während der Tauphase (Mikroeilslinsenpumpe) wie auch das oberflächliche kryogene Saugen während der Frostphase.
18. Ausschlaggebend für den Eintrag von Tausalzen in das Betongefüge ist in erster Linie die Sättigung durch die Mikroeilslinsenpumpe, da das kryogene Saugen vorwiegend einen reinen Oberflächenprozess abbildet. Die Mikroeilslinsenpumpe führt daher bei hohen Salzkonzentrationen zu einer Abschwächung des Angriffsgrades, da eine erhöhte Salzbelastung im Beton die Eisbildung abschwächt. Das kombinierte Schadensmodell ist damit in der Lage, den bei einer Frost-Tausalz-Belastung auftretenden Effekt einer Pessimalkonzentration theoretisch zu begründen.
19. Wichtige Annahmen des kombinierten Schadensmodells wurden experimentell überprüft. Insbesondere wurde gezeigt, dass eine erhöhte Tausalzkonzentration im Zementstein dazu führt, dass die durch das kryogene Saugen hervorgerufene Zunahme des Eisvolumens abgeschwächt und das Eisvolumen bei sehr hohen Konzentrationen sogar wieder abnimmt. Damit wurde auch experimentell bestätigt, dass die beiden Vorgänge des kryogenen Saugens und der Mikroeilslinsenpumpe beim Frost-Tausalz-Angriff in Kombination auftreten.
20. Auf Grundlage des kombinierten Schadensmodells konnte ergänzend zu den schon bekannten Vorstellungen ein neuer Erklärungsansatz für die Verringerung des Frost-Tausalz-Widerstandes von Betonen mit Hochofenzement gefunden werden. Dieser beruht auf Unterschieden im Gefrierverhalten der porösen carbonatisierten Betonrandschicht und dem weniger porösen, nicht-carbonatisierten Kernbeton.
21. Zusammenfassend ist festzustellen, dass im Ergebnis der Arbeit nun ein Modell zur Verfügung steht, welches die Vorgänge bei einem Frost-Tausalz-Angriff auf Beton widerspruchsfrei abbildet und insbesondere die bei dieser Angriffsart entstehenden Abwitterungen plausibel herleitet. Das Modell kann somit als Ausgangspunkt für die Prognose des Frost-Tausalz-Widerstandes für Systeme dienen, für die bislang nur wenig Erfahrungen vorliegen. Darüber hinaus kann es die Basis für zukünftige Lebensdauerbemessungen im Bereich frost-tausalz-belasteter Betone darstellen.