

Müller, M.; Ludwig, H.-M.

Neue Modelle für den Frost-Tausalz-Angriff auf Beton

1. Einleitung

Für den Frost- und Frost-Tausalzangriff wurden seit den 1950er Jahren verschiedene Modelle entwickelt, z.B. [1-4]. In Deutschland findet vorrangig das Modell der Mikroeislinsepumpe [4] Beachtung. Diese Modelle berücksichtigen meist nicht hinreichend alle Aspekte eines Frost-Tausalz-Angriffes, insbesondere das Phänomen der pessimalen Tausalzkonzentration.

In der jüngeren Vergangenheit wurden drei Modelle aufgestellt, die den Frost-Tausalz-Angriff mit neuartigen Ansätzen beschreiben oder bestehende Ansätze weiterentwickeln. Im vorliegenden Beitrag werden diese Modelle vorgestellt, kritisch diskutiert und ausgewählte Annahmen werden experimentell überprüft.

2. Die Schadensmodelle

2.1. Das Glue Spall-Modell

Valenza und Scherer veröffentlichten 2006 das Glue Spall-Modell [5]. Hierbei wird die Wechselwirkung zwischen einer äußeren Eisschicht und der Betonoberfläche als schadensauslösender Mechanismus erachtet. Das Modell fußt auf der Beobachtung, dass das Erscheinungsbild eines Frost-Tausalz-Schadens Ähnlichkeiten mit einer Technik zur Glasbearbeitung aufweist, dem „glue spalling“. Dabei wird eine Lage Kleber auf eine Glasoberfläche aufgetragen, ausgehärtet und im Ofen erhitzt. Der Kleber schwindet stark, reißt schollenartig auf und bricht dünne Scherben aus der Glasoberfläche heraus [6].

Überträgt man diesen Mechanismus auf den Frost-Tausalz-Angriff, so kann das Entstehen von Abwitterungen wie folgt erklärt werden: Gefriert Wasser auf Beton, so verursacht die weitere Abkühlung Spannungen in der Grenzfläche zwischen Eisschicht und Beton. Ursache ist die stärkere thermische Verkürzung des Eises ($50 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) [7] im Vergleich zum Beton ($10 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) [8].

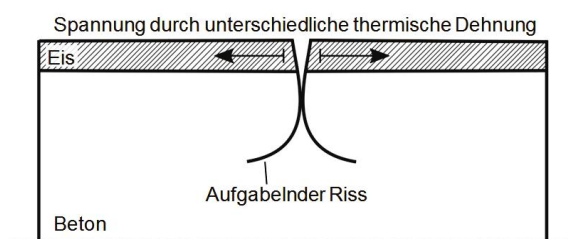


Abb. 1: Rissfortpflanzung von einer Eisschicht in den Beton (Glue Spall-Effekt), nach [5]

Die Salinität der Tausalzlösung beeinflusst die Interaktion zwischen Eis und Beton. Beim Abkühlen einer moderat konzentrierten Tausalzlösung (3 % NaCl) unter den Gefrierpunkt, gefriert die Lösung nicht vollständig. Es bilden sich Kristalle aus purem Eis, die Salzkonzentration in der Restlösung erhöht sich und ihr Gefrierpunkt wird weiter verringert.

Bis zum Erreichen der Eutektikumtemperatur (-21,2 °C bei NaCl-Lösung) liegen Einschlüsse nicht gefrorener Restlösung im Eis vor. Die Einschlüsse verringern die Festigkeit des Eises. Thermische Spannungen können so zur Ausbildung von Rissen führen, welche sich in den Beton fortsetzen (vgl. Abb. 1) und zum Abwittern der Oberfläche führen können [5].

Reines Wasser gefriert bei 0 °C. Seine Zugfestigkeit ist hoch genug, um die thermisch bedingten Spannungen bis -20 °C rissfrei aufzunehmen [5]. Eine gefrorene, höher konzentrierte Salzlösung (z.B. 6 % NaCl) hat eine zu geringe Festigkeit, um Spannungen aufzubauen, die den Beton schädigen. Das Modell erklärt so das Pessimum der Tausalzkonzentration mit den mechanischen Eigenschaften des Eises in Abhängigkeit vom Salzgehalt [5].

Dem Modell liegt eine umfassende theoretische Betrachtung zu Grunde, die in sich plausibel erscheint. Wichtige Eingangsgrößen in der Modellbildung sind jedoch kritisch zu hinterfragen, insbesondere die Zugfestigkeit des Eises in Abhängigkeit vom Anteil der ungefrorenen Restlösung. Hierfür nutzten Valenza und Scherer die Ringzugfestigkeit nach [9] und später die Biegezugfestigkeit [10] von Meereis nach [11]. Besser wäre die Verwendung der zentrischen Zugfestigkeit von Eis, welche jedoch mit 0,2 bis 0,8 MPa [12] zu gering ist, um bei den Modellberechnungen plausible Ergebnisse zu ergeben.

Weiterhin wurde nicht berücksichtigt, dass beim Gefrieren einer Salzlösung mit einem einaxial gerichteten Temperaturgradienten die ungefrorenen Bereiche mit stärker konzentrierter Restlösung zu den Regionen mit höherer Temperatur wandern [13]. Dies geschieht mit Geschwindigkeiten von ca. 2 µm/s [14]. In einer Frost-Tausalz-Prüfung mit Eisdicken von 5 mm könnte theoretisch die gesamte ungefrorene Restlösung aus der Eisschicht hin zur Betonoberfläche verdrängt werden. Die Eigenschaften des Eises ändern sich entsprechend.

2.2. Cryogenic Suction-Modell

Lindmark [15] verband in seinem Modell die Theorie des osmotischen Wachstums von Eislinsen in Beton [16] mit Aspekten der Frosthebung in Böden. Sein Modell wurde später von Liu und Hansen [17] aufgegriffen, welche dafür die Bezeichnung „Cryogenic Suction“ (dt. Kryogenes Saugen) einführten.

Wenn bei Frost Eislinsen in den Kapillaren des Betons wachsen, dann entziehen sie dem umgebenden Zementstein Porenlösung, bis sich ein Gleichgewichtszustand einstellt. Der Zementstein ist also bestrebt Feuchtigkeit aufzunehmen. Die Feuchtezufuhr erfolgt gemäß dem Modell durch noch ungefrorene Restlösung in der Eisschicht an der Betonoberfläche (vgl. Abb. 2). Die Lösung wird vom Zementstein aufgesaugt und die Eislinsen im oberflächennahen Bereich können weiter wachsen. In dieser Schicht herrschen somit ähnliche Bedingungen vor wie bei der Frosthebung von Böden [15]. Nach [17] resultiert daraus eine Expansion der oberflächennahen Zementsteinschicht, während der tieferliegende Beton beim Gefrieren schwindet. Die entstehenden Spannungszustände sollen Abwitterungen verursachen.

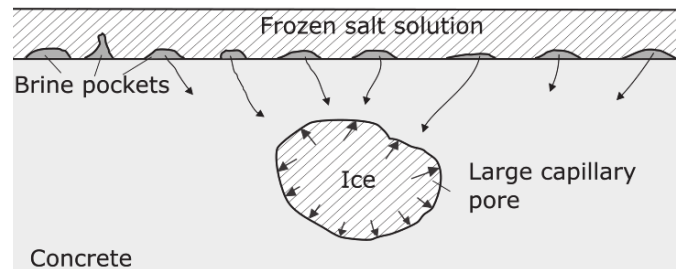


Abb. 2: Flüssigkeitszufuhr (ungefrorene, hoch-konzentrierte Anteile der Tausalzlösung) zu einer Eislinse, nach [15, 17]

Die Konzentration der Tausalzlösung beeinflusst nicht nur den Anteil ungefrorener Restlösung in Abhängigkeit von der Temperatur. Wenn Salzionen in den Zementstein eindringen, dann erniedrigen sie zudem den Gefrierpunkt der Porenlösung in diesem Bereich. Dieser Effekt könnte dominant werden, wenn Tausalzlösungen mit Konzentrationen $> 3\%$ NaCl eingesetzt werden. Nach [15] ist dies die Ursache für das Pessimum der Tausalzkonzentration.

2.3 Brine Rejection-Modell

Das Brine Rejection-Modell (dt. Soleabsonderung) wurde 2015 von Yener [18] aufgestellt. Es basiert auf einer ähnlichen Phänomenologie wie das Glue Spall-Modell, betrachtet aber zusätzlich die Solemigration in gefrorener Tausalzlösung. Diese stellt den Kern seiner Schadenstheorie dar.

In einer Eisschicht aus gefrorener Tausalzlösung migrieren die Einschlüsse aus ungefrorener, höher konzentrierter Restlösung zu wärmeren Bereichen; bei einaxialer Frostbelastung von außen in Richtung Betonoberfläche. Bei geringer Sättigung wird die Lösung vom Beton aufgenommen. Ist die Betonoberfläche nach einigen Frost-Tauwechsellern gesättigt, kann die Lösung nicht entweichen, da die Eisschicht einen Verbund zum Beton ausbildet. Im Ergebnis soll sich ein hydraulischer Druck in der Restlösung einstellen und ein Abheben der Eisschicht verursachen, wobei anhaftender Zementstein abwittert [18].

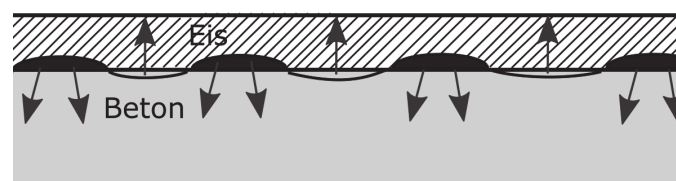


Abb. 3: Schematische Darstellung des Brine Rejection – Mechanismus, nach [18]

Das Pessimum der Tausalzkonzentration erklärt Yener damit, dass in einer höher konzentrierten Tausalzlösung ein Netzwerk aus ungefrorener Restlösung einen Druckausgleich in der Flüssigkeit ermöglicht. Bei geringer Konzentration ist der Anteil der flüssigen Phase zu gering für einen Druckaufbau [18].

3. Dokumentierte experimentelle Überprüfung der Modellvorstellungen

Die **Glue spall** Theorie wurde überwiegend in modellhaften Versuchen an dünnen Zementsteinplatten überprüft, auf denen verschiedene Lösungen gefroren wurden. Beim Gefrieren von Wasser wurde ein Aufschüsseln der Zementsteinplatte beobachtet, ohne dass Risse im Eiskörper auftraten.

Beim Gefrieren einer Tausalzlösung mit 3 % NaCl trat hingegen kein Aufschüsseln auf, da die Spannung in der Eisschicht (vermutlich) durch Rissbildung entspannt wurde [5]. In Berechnungen zur Rissinduzierung und zum Rissverlauf in den Beton konnten Valenza und Scherer aufzeigen, dass mit steigender Eisschichtdicke die Risstiefe ansteigt und somit die Abwitterungen verstärkt werden sollten [19]. Die theoretische Abhängigkeit der Abwitterungsintensität von der Eisschichtdicke wurde in [20-22] zur Überprüfung des Glue Spall-Modells genutzt. In Frost-Tausalzprüfungen an Mörteln und Beton traten tendenziell höhere Abwitterungsmengen bei steigender Eisschichtdicke auf.

Lindmark überprüfte seine Theorie (**Cryogenic suction**), indem er Mörtelscheiben (mit und ohne Luftporen) in tiefgekühlten NaCl-Lösungen einlagerte. Die Lagerungstemperaturen (-6 / -10 / -16 °C) entsprachen (überwiegend) den Gefrierpunkten der NaCl-Lösungen (6,6 / 14,4 / 19,7 %). Grundidee der Versuche war, eine Eisbildung in den Mörteln zu provozieren und gleichzeitig eine Feuchtezufuhr von außen zu gewährleisten [15].

Die in den tiefgekühlten Lösungen gelagerten Mörtelscheiben wurden zu verschiedenen Zeitpunkten gewogen. Eine Gewichtszunahme zeigte dabei ein Eiswachstum in der Probe an, welches von der äußeren Lösung unterstützt wurde. Lindmark konnte so wesentliche Punkte seiner Theorie bestätigen. Die Mörtel ohne Luftporen wurden so stark geschädigt, dass diese Messungen nicht verwertbar waren. An Mörteln mit Luftporen zeigte sich, dass (a) mit niedrigerer Lagerungstemperatur und (b) mit niedrigerer Salzkonzentration im Mörtel, die Gewichtszunahme stärker ausgeprägt ist [15].

Ein Schwachpunkt von Lindmarks [15] Versuchsaufbau war, dass die Mörtelscheiben schockartig gekühlt wurden, was vermutlich zu einer unrealistisch hohen Beanspruchung führte. Die Mörtel ohne Luftporen wiesen zudem vor der Prüfung Sättigungsgrade von fast 100 % auf, so dass das Gefrieren dieser Mörtel zwangsläufig zu einer starken Schädigung führen musste. Nichtsdestotrotz zeigen diese Modellversuche, dass eine äußere Feuchtezufuhr während der Frostphase (also bei unter 0 °C) zu einem verstärkten Eiswachstum in der Probe führen kann.

Liu und Hansen [17] untersuchten den Einfluss der äußeren Feuchtezufuhr mittels Tieftemperaturdilatomie. Die Feuchte wurde dabei über an der Probe anliegende Schwämme zugeführt, die mit unterschiedlich konzentrierten Tausalzlösungen vorgesättigt waren. Mit Tausalzlösung traten Dehnungen im Tieftemperaturbereich auf, bei Zufuhr von reinem Wasser ein Frostschrumpfen. Das Pessimum der Tausalzkonzentration konnte mit diesen Versuchen allerdings nicht völlig zufriedenstellend erklärt werden.

Zum **Brine rejection** Modell [18] wurden keine Nachweise veröffentlicht.

3.2 Eigene Untersuchungen und Ergebnisse

Im Rahmen eigener Untersuchungen sollten grundlegende Annahmen der Schadenstheorien mittels etablierter Frost-Tausalz-Prüfungen für Beton überprüft werden. Dazu wurde der Einfluss unterschiedlicher Tausalzkonzentrationen auf die Schädigungsintensität untersucht, da die Lösungskonzentration einen wichtigen Parameter in den Modellen darstellt. Solche Untersuchungen wurden zwar schon vielfach durchgeführt, aber meist nicht bei abgestuften Konzentrationen unterhalb von 3 M.-% NaCl. Ergebnisse aus [23, 24] deuten darauf hin, dass die pessimale Tausalz-konzentration im Bereich unterhalb von 3 M.-% NaCl liegen kann.

Die Frost-Tausalz-Prüfungen erfolgten im CDF-Test an einem Luftporenbeton (3,5 bis 5,5 Vol.-% LP) unter Variation der NaCl-Konzentrationen. Nach Vorversuchen (CDF_NaCl_Pre 1 bzw. 2 in Abb. 4, li) wurde eine Abstufung von 0/ 0,1/ 0,5/ 1,5 und 3,0 % NaCl festgelegt. Weitere Angaben enthält [22]. Die Proben wurden bis zum 7 Tag in Wasser und dann 21 Tage im Klima 20/65 vorgelagert. Weitere Proben wurden nach der Wasserlagerung in Folie gewickelt, um einen höhere Sättigung vor dem kapillaren Saugen einzustellen. Das kapillare Saugen erfolgte mit den NaCl-Konzentrationen, die auch bei der Befrostung genutzt wurden.

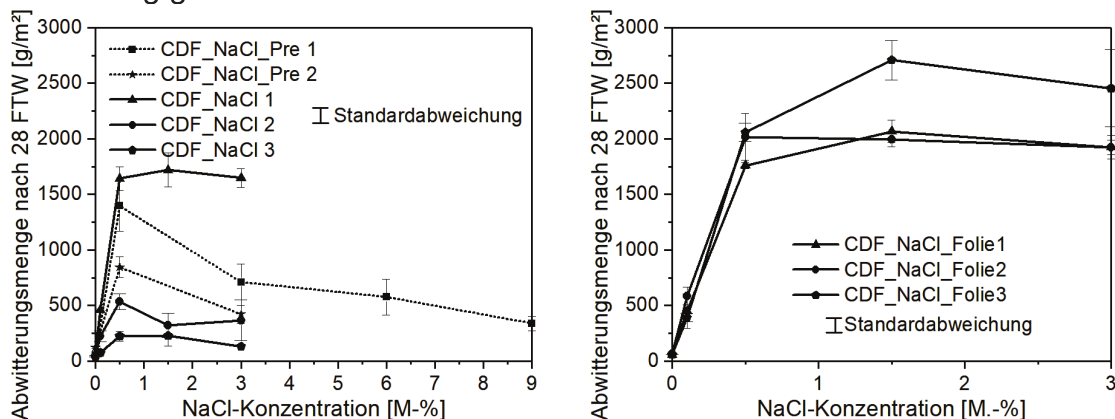


Abb. 4: Einfluss der Frost-Tausalzkonzentration auf die Abwitterungsmenge nach 28 Frost-Tau-Wechseln im CDF-Test. Links - Standardvorlagerung, rechts – Vorlagerung in Folie.

Das Pessimum bei 3,0 M.-% NaCl konnte nicht bestätigt werden. Stattdessen trat ein relativ einheitlicher Schädigungsgrad im Bereich von 0,5 – 3,0 M.-% NaCl auf, mit einer Tendenz zur höchsten Schädigung bei 0,5 M.-% NaCl mit Standardvorlagerung (vgl. Abb. 4, li) bzw. bei 1,5 M.-% NaCl mit Vorlagerung in Folie (vgl. Abb 4., re). Zudem war bei der Vorlagerung in Folie das Niveau der Abwitterungen durch die stärkere Ausgangsfeuchte der Proben deutlich erhöht.

Das Glue Spall-Modell bildet eine entsprechende Sensibilität bei niedrigen Tausalzkonzentrationen ab, da die Zugfestigkeit des Eises [9] bei sehr geringen Konzentrationen stark abfällt. Dem Modell widerspricht aber die relativ hohe Abwitterungsmenge bei ≥ 6 M.-% NaCl (Abb. 4, li). Bei -20 °C weist Tausalzlösung in diesem Konzentrationsbereich keine Zugfestigkeit mehr auf. Auch nach dem Brine Rejection-Modell dürften keine Abwitterungen auftreten.

Die Tendenz zu einem höheren NaCl-Pessimum bei Vorlagerung in Folie steht in Einklang mit dem Modell von Lindmark [15], denn die Proben konnten aufgrund des höheren Feuchtegehaltes weniger Prüflösung beim kapillaren Saugen aufnehmen. Dementsprechend wurden auch weniger Chloridionen vor dem ersten Gefrieren aufgenommen. Die Eisbildung im oberflächennahen Zementstein ist daher weniger stark beeinträchtigt und das Eindringen von NaCl während der CDF-Prüfung sollte besser kompensiert werden können.

Weitere Untersuchungen erfolgten mittels Tieftemperatur-Differentialkalorimetrie (DSC) an wassergesättigtem Zementstein. Nach dem Einwiegen in Aluminiumtiegel wurde ein Tropfen Wasser oder 19,7 %ige NaCl-Lösung (Gefrierpunkt -16°C) auf die Probe gegeben sowie eine geringe Menge Metaldehydpulver als Keimbildner für die Eisbildung aufgestreut. Die Tiegel wurden anschließend verschlossen. Die Proben wurden drei Frost-Tau-Wechseln zwischen -14 und $+20^{\circ}\text{C}$ mit einer Kühl- und Heizrate von 10 K/min ausgesetzt. Bei -14°C wurde diese Temperatur für 10 min gehalten, um ein weiteres Eiswachstum im Zementstein zu ermöglichen. Die Analysen erfolgten mit einer DSC Polyma 214 (Netzsch) mit Intracooler. Bei der unteren Temperaturgrenze von -14°C wurde ein Gefrieren der NaCl-Lösung auf der Probe vermieden. Abb. 5 zeigt den Wärmestrom und den Temperaturverlauf der wasserbeaufschlagten Probe in der Tauphase der Frost-Tauzyklen.

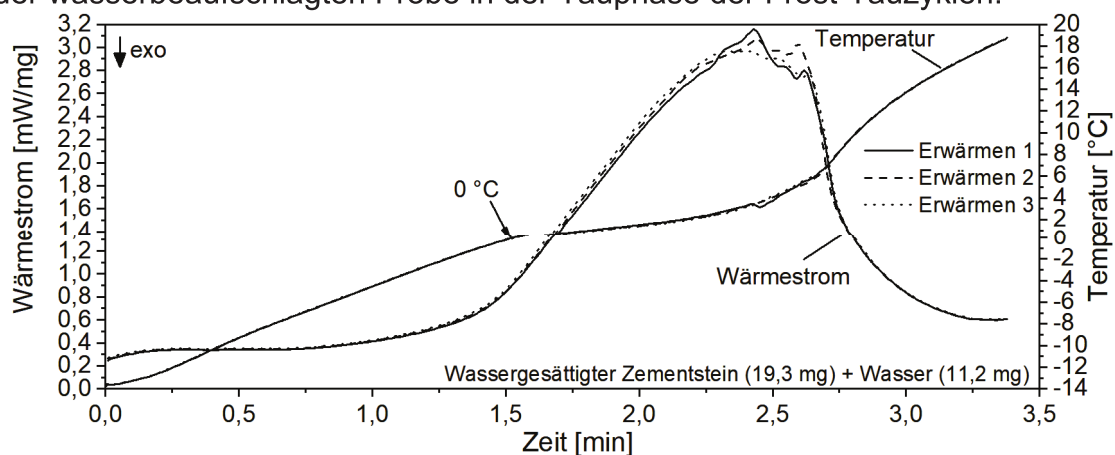


Abb. 5: Ergebnisse der Tieftemperatur-DSC Messungen am Zementstein mit Wasser, 3 Frost-Tau-Zyklen, nur Tauphasen sind dargestellt

Bei -10°C setzt der Schmelzvorgang des Eises im Zementstein ein. Ab ca. 0°C steigt der Wärmestrom (auch erkennbar am Abknicken der Temperaturkurve), durch das Schmelzen des makroskopischen Eises auf der Probe deutlich an. Die Schmelzenthalpien sind bei den drei Frost-Tauzyklen vergleichbar ausgeprägt. Die beim Gefrieren gebildete Eismenge bleibt offensichtlich gleich.

Abb. 6 zeigt den Wärmestrom und den Temperaturverlauf der Probe mit 19,7 %iger NaCl-Lösung in der Tauphase der Frost-Tauzyklen. Der Wärmestrom infolge des Tauprozesses ist deutlich geringer ausgeprägt (Skalierung y-Achse Wärmestrom beachten). Die Schmelzvorgänge setzen bei -14°C ein und sind bei Erreichen von 0°C weitgehend abgeschlossen.

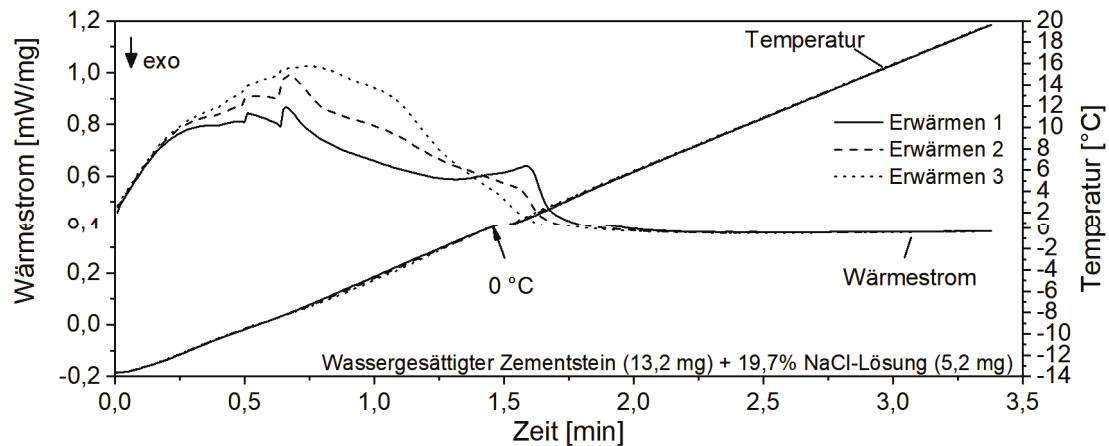


Abb. 6: Ergebnisse der Tieftemperatur-DSC Messungen am Zementstein mit 19,7 %iger NaCl-Lösung, 3 Frost-Tau-Zyklen, nur Tauphasen sind dargestellt

Auffällig ist die mit steigender Anzahl Frost-Tau-Wechsel zunehmende Schmelzenthalpie. Diese deutet auf eine sukzessiv zunehmende Eismenge beim Gefrieren hin, was auf die Aufnahme der NaCl-Lösung durch den Zementstein zurückzuführen ist. Die Messungen bestätigen damit den Vorgang des „kryogenen Saugens“ (Modell Lindmark [15]).

4. Zusammenfassung

Für den Frost-Tausalz-Angriff auf Beton existiert eine Reihe von Schadensmodellen. Drei aktuelle Modelle nehmen für sich in Anspruch, den Schadensmechanismus und insbesondere den Einfluss niedrig konzentrierter Tausalzlösungen auf den Schädigungsgrad gut abbilden zu können. Das Glue Spall-Modell [5] sowie das Cryogenic Suction-Modell [15, 17] bieten plausible Ansätze. In Untersuchungen konnten einige Modellvorstellungen bestätigt werden, insbesondere der Prozess des „kryogenen Saugens“. Ob dieser Vorgang oder die mechanische Glue Spall-Belastung tatsächlich schadensauslösend sind, kann anhand der Untersuchungen jedoch noch nicht zweifelsfrei bestätigt oder ausgeschlossen werden. Das Brine Rejection-Modell [18] zeigt wichtige Prozesse auf, die für die Schädigung bei einem Frost-Tausalz-Angriff relevant sein können. Als allein stehendes Modell ist es eher nicht geeignet.

Literatur

- [1] Powers, T.C.: A working hypothesis for further studies of frost resistance of concrete. *Journal of the American Concrete Institute*, Jahrgang 41, S. 245-272, 1945.
- [2] Powers, T.C.: *Freezing Effects in Concrete*. ACI Special Publication SP-47, American Concrete Institute, S.1-11, 1975.
- [3] Everett, D.H.: The thermodynamics of frost damage to porous solids. *Transactions of the Faraday Society*, Jahrgang 57, S. 1541-1551, 1961.
- [4] Setzer, M.J.: Development of the micro-ice-lens model. 2nd International RILEM Workshop on Frost resistance of Concrete, S. 133-145, 2002.
- [5] Valenza, J.J.; Scherer, G.W.: Mechanism for salt scaling. *Journal of the American Ceramic Society*, Jahrgang 89, Heft 4, S. 1161-1179, 2006.

- [6] Gulati, S.T., Hagy, H.E.: Analysis and Measurement of Glue-Spall Stresses in Glass-Epoxy Bonds. *Journal of the American Ceramic Society*, Jahrgang 65, Heft 1, S. 1-5, 1982.
- [7] Pounder, E.R.: Kapitel 7 - The Thermal and Electrical Properties of Ice. *The Physics of Ice*, S. 116-132, Pergamon Verlag, 1965.
- [8] Mindess, S.; Young, J.F.: *Concrete*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1981.
- [9] Weeks, W.F.: Studies of salt ice I: The tensile strength of NaCl ice. *US CRREL Research Report 80*, 1961.
- [10] Sun, Z.; Scherer, G.W.: Effect of air voids on salt scaling and internal freezing. *Cement and Concrete Research*, Jahrgang 40, Heft 2, S. 260-270, 2010.
- [11] Timco, G.W.; O'Brien, S.: Flexural strength equation for sea ice. *Cold Regions Science and Technology*, Jahrgang 22, Heft 3, S. 285-298, 1994.
- [12] Timco, G.W.; Weeks, W.F.: A review of the engineering properties of sea ice. *Cold Regions Science and Technology*, Jahrgang 60, Heft 2, S. 107-129, 2010.
- [13] Whitman, W.G.: Elimination of salt from sea-water ice. *American Journal of Science*, Jahrgang. 11, Heft 62, S. 126-132. 1926.
- [14] Cruz Jr., C.: Microscopic observations of internal frost damage and salt scaling. *Dissertation, University of California, Berkeley*, 2008.
- [15] Lindmark, S.: Mechanisms of salt frost scaling on Portland cement-bound materials: studies and hypothesis. *Dissertation, Lund University*, 1998.
- [16] Powers, T.C.; Helmuth, R.A.: Theory of volume changes in hardened Portland cement paste during freezing. *Proceedings of the Highway Research Board*, Jahrgang 32, S. 285-297, 1953.
- [17] Liu, Z.; Hansen, W.: A hypothesis for salt frost scaling in cementitious materials. *Journal of Advanced Concrete Technology*, Jahrgang 13, Heft 9, S. 403-414, 2015.
- [18] Yener, E.: A new frost salt scaling mechanism for concrete pavements based on brine rejection from ice layer adhered to concrete surface. *Road Materials and Pavement Design*, Jahrgang 16, Heft 1, S. 89-100, 2015.
- [19] Valenza, J.J.: Mechanism for salt scaling. *Dissertation, Princeton University*, 2005.
- [20] Tremblay, M.H.; Lory, F.; et al.: Ability of the glue spall model to account for the de-icer salt scaling deterioration of concrete. *12th International Congress on the Chemistry of Cement, Montreal, Canada*, 2007.
- [21] Çopuroğlu, O.; Schlangen, E.: Modeling of frost salt scaling. *Cement and Concrete Research*, Jahrgang 38, Heft 1, S. 27-39, 2008.
- [22] Müller, M.; Ludwig, H.-M.: „Glue spall“ – Ein geeignetes Modell für den Frost-Tausalz-Angriff? *Beiträge zur 5. DAfStb-Jahrestagung mit 58. Forschungskolloquium, Band 1*, S.1-12, 2017.
- [23] Setzer, M.J.; Keck, H.-J.; et al.: Entwicklung eines Prüfverfahrens für Beton in der Expositions-kategorie XF2. *Schlussbericht zum Forschungsprojekt FE 15.367/2002/DRB. Bundesanstalt für Straßenwesen, Bericht Nummer B 56*, 2007.
- [24] Liu, Z.: Frost Deterioration in Concrete due to Deicing Salt Exposure: Mechanism, Mitigation and Conceptual Surface Scaling Model. *Dissertation, Univ. of Michigan*, 2014.

Ansprechpartner

Dipl.-Ing. Matthias Müller,
 Prof. Dr.-Ing. Horst-Michael Ludwig
 Bauhaus-Universität Weimar,
 F.A. Finger-Institut für Baustoffkunde
 Coudraystr. 11, D-99421 Weimar

Kontakt: matthias.mueller@uni-weimar.de