

Zeitschrift:	Tec21
Herausgeber:	Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein
Band:	127 (2001)
Heft:	40: Betontechnologie
 Artikel:	Schadensmechanismen bei der Frost-Tausalz-Bearbeitung von Beton
Autor:	Kaufmann, Josef
DOI:	https://doi.org/10.5169/seals-80218

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

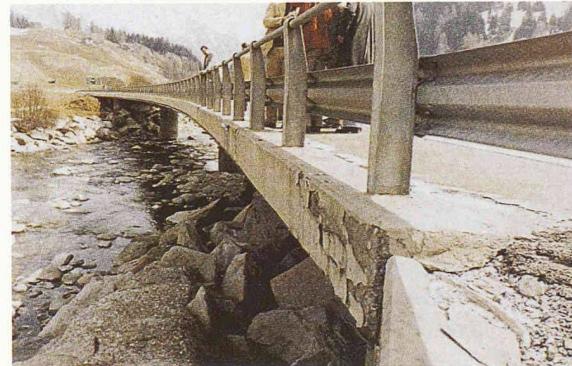
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 08.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Schadensmechanismen bei der Frost-Tausalz-Beanspruchung von Beton

Die Frost- und Frost-Tausalz-Beständigkeit und deren Prüfung gehören zu den betontechnologischen Themen, die weltweit am meisten erforscht wurden und weiterhin werden.
Trotzdem sind noch einige wesentliche Fragen offen.



1

Typische Schäden als Folge der Frost-Tausalz-Beanspruchung einer Brücke (A 13 bei Splügen)

So ist zum Beispiel noch nicht bekannt, weshalb im Versuch nur dann Ablösungen entstehen, wenn während des Frostwechsels auf der Prüfkörperoberfläche eine Flüssigkeitsschicht vorhanden ist, und weshalb mit 3%-NaCl-Lösung die Ablösungsmenge um eine bis zwei Größenordnungen grösser als mit Wasser ist. Der Einsatz neuer Betonrezepturen auf der Basis von Zusatzmitteln und Zusatzstoffen sowie die europäische Standardisierung verleihen diesem Thema neue Aktualität. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind in einer Dissertation ausführlich vorgestellt und diskutiert worden [1].

Theoretische Grundlagen – Gefrieren einer Porenlösung

Der Gefrier- und Schmelzpunkt einer wässrigen Lösung ist einerseits durch die gelösten Ionen (Salz) und andererseits infolge von Oberflächenspannungseffekten auch in feinen Poren ($< 1 \mu\text{m}$) erniedrigt. Hauptsächlich die Porengröße, aber auch die Porenform sind die wesentlichen Einflussfaktoren. Beziehungen zwischen Porenradius und Gefrier-/Schmelzpunkt können aus thermodynamischen Modellen hergeleitet werden.

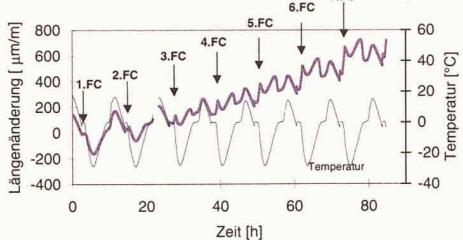
In einem Haufwerk mit Poren unterschiedlicher Durchmesser und Geometrie gefriert eine wässrige Lösung erst dann, wenn die entsprechende Temperatur unterschritten wird. Selbst wenn dies der Fall ist, muss es jedoch nicht automatisch zur Phasenumwandlung kommen, denn die Porenlösung kann unterkühlen. Damit Eis gebildet wird, muss die Phasenumwandlung durch so genannte Gefrierkeime eingeleitet werden (heterogene Nukleation). Erst bei sehr tiefen Tempera-

turen ($< -40^\circ\text{C}$) ist die Anwesenheit von Gefrierkeimen nicht mehr nötig, und der Phasenübergang erfolgt spontan (homogene Nukleation). Das Gefrieren einer Porenlösung ist mit einer Energiefreisetzung (Wärme) und mit einer 90%igen Volumenausdehnung verbunden. Falls nicht genügend freier Raum zur Verfügung steht, entstehen hydraulische oder hydrostatische Drücke [2].

Laboruntersuchungen und Resultate

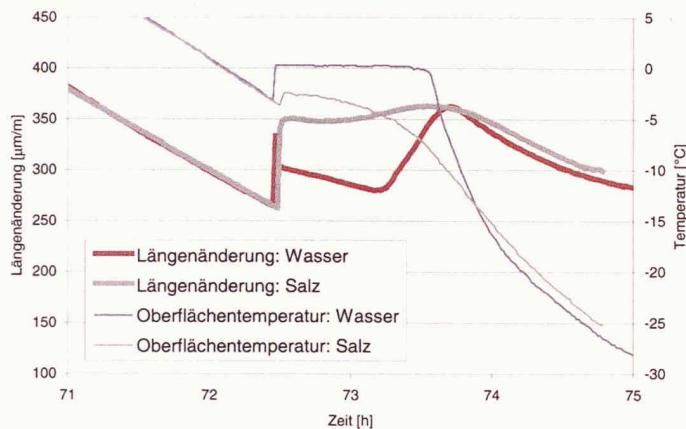
Es wurden 1–2 Jahre alte, aus Würfeln mit 200 cm Kantenlänge entnommene Betonproben untersucht. Bei der Betonherstellung verwendete man Portlandzement (CEM I 42.5). Die bei der Eisbildung im Porenraum freigesetzte Wärme wurde mittels Kalorimetriemessungen beobachtet. Bei diesen Messungen konnte gezeigt werden, dass ungewollte Unterkühlungseffekte Messartefakte verursachen können. Durch die Verhinderung von Unterkühlungseffekten mittels spezieller Gefrierkeime an der Probenoberfläche konnte festgestellt werden, dass ein Teil des Porenwassers in makroskopischen Poren bereits in der Nähe von 0°C gefriert und dass sich weit geringere Hysterese-Effekte zwischen Gefrieren und Auftauen ergeben, als dies sonst in der Literatur beschrieben ist [4,5]. Dies erlaubt die Schlussfolgerung, dass die Eisbildung im Betoninneren durch das kontinuierliche Fortschreiten einer eindringenden Eisfront erfolgt. Es ergeben sich höchstens lokale Unterkühlungen, die durch enge Poreneingänge bedingt sind.

Anschliessend wurde die Längenänderung von Betonproben im gesättigten Zustand während der Frostbean-



2

Längenänderung parallel zur Frostmediumsschicht mit zunehmender Anzahl Frostzyklen (FC)



3

Detail der Längenänderung beim Gefriedurchgang; 1. Versuch mit Wasser und 2. Versuch mit Salzlösung (3 % NaCl) als Frostmedium



4

Typische Risse parallel zur Frost-Tausalz-beanspruchten Oberfläche und entlang eines Zuschlagkorns im Innern (imprägnierter Anschliff und fluoreszierendes Licht)

spruchung erstmalig mit einer aufstehenden Flüssigkeitsschicht gemessen. Die Flüssigkeitsschicht verhinderte einerseits unerwünschte Unterkühlungseffekte und erlaubte andererseits das Studium von Nachtransport- und Wiedersättigungsphänomenen. Bei der Messung der Längenänderung des Betons parallel zu üblicherweise verwendeten Platten (Dicke 50 mm) ergab sich ein rein thermisches Verhalten. Da die Beanspruchung vor allem in der obersten Betonschicht gross ist, ergab sich bei Messungen an dünneren Platten (Dicke 10 mm) ein davon abweichendes typisches Verhalten: mit zunehmender Anzahl Frostwechseln konnte ein anwachsender Peak beim Gefrierdurchgang (Pfeile in Bild 2) beobachtet werden. Dies ist auf eine zunehmende Wassersättigung und Schädigung zurückzuführen. Dasselbe Verhalten wurde bei Längenmessungen senkrecht zur Frostmediumsschicht beobachtet [1]. Wird Wasser als Frostmedium verwendet, können (mit Unterkühlung) zwei verschiedene Peaks beim Gefrieren (Bild 3) unterschieden werden: ein spontaner, steiler Gefrierekspansionspeak bei Beginn der Eisbildung (nach einer Unterkühlung der Frostmediumsschicht um ca. 3 °C) und eine kontinuierliche, langsame Expansion, nachdem das gesamte Frostmedium gefroren ist. Beim Gefrieren des Frostmediums wird Wärme frei, weshalb die Temperatur konstant bei der Gefriertemperatur verharrt und sich ein Temperaturplateau ausbildet (Bild 3 zwischen 72,5 bis 73,5 Stunden). Nur dank der Anwendung einer Frostmediumsschicht und des daraus resultierenden Temperaturplateaus können diese beiden Längenänderungen zeitlich separiert werden.

Wird eine Salzlösung als Frostmedium verwendet, ergibt sich auch ohne Unterkühlung des Frostmediums eine grosse spontane Längenänderung bei Beginn der Eisbildung. Die anschliessende kontinuierliche Längenausdehnung ist hingegen verminderd. Dies deutet darauf hin, dass bei der Tausalzbeanspruchung ein viel grösserer Teil des Porenwassers bereits bei der Initiierung der Eisbildung (spontane Längenänderung) gefriert. Damit lässt sich der signifikante Einfluss des Tausalzes auf die Schädigung (Abplatzungen) erklären. In Bild 3 ist die gemessene Längenänderung im Verlauf eines Frostwechsels im Detail wiedergegeben.

Um zu zeigen, dass eine gemessene Längenänderung auch einen Schaden bewirkt, wurden die Schallemissionen von Betonplatten mit aufstehender Frostmediumsschicht (Wasser, Salzlösung) im Verlaufe einiger Temperaturzyklen kontinuierlich gemessen. Es zeigten sich zu den Längenänderungsmessungen analoge Resultate mit bedeutenden Schallemissionen im Falle einer Unterkühlung und Schallemissionen, wenn die Temperatur nach dem Temperaturplateau erneut abfällt.

Der Schaden wurde auch mittels Gefügeuntersuchungen mikroskopisch nach der Frost-Tausalz-Beanspruchung am Bauwerk oder im Labor untersucht. Zwischen dem Schadensbild im Labor und jenem am Bauwerk ergab sich kein prinzipieller Unterschied. Es wurden oberflächenparallele Risse meist entlang von Zuschlagkörnern und in verschiedenen Tiefen (bis 10 mm) beobachtet (Bild 4). Diese Risse werden in konventionellen Schnellbewitterungsverfahren, in welchen

nur die Abplatzungen gesammelt und gezählt werden, nicht mitberücksichtigt.

Um den Zeitpunkt der Eisbildung im Betoninneren besser analysieren zu können, wurde die Laufzeit eines Ultraschallimpulses zwischen einem Sender und einem Empfänger gemessen. Da die Schallgeschwindigkeit beim Phasenübergang von Wasser zu Eis massiv anwächst (Wasser: $c_W = 1485 \text{ m/s}$; Eis: $c_E = 3828 \text{ m/s}$), ergeben sich nach der Eisbildung signifikant kürzere Laufzeiten. Da jeweils nur der schnellste Weg gemessen wird und die Geschwindigkeit im Beton höher ist als jene in einer gefrorenen Frostmediumsschicht, kann mit einer aufstehenden Frostmediumsschicht gemessen werden. Bei der Verwendung von Tausalzlösungen als Frostmedium und beim Auftreten von Unterkühlungen erhöhte sich die Schallgeschwindigkeit nach Initiierung der Eisbildung rapide. Ohne Unterkühlung und ohne Tausalzlösung wurde nur ein langsamer Anstieg der Schallgeschwindigkeit gemessen. Tausalzbeanspruchung und Unterkühlungen ergeben ein schnelles Eiswachstum und daher ein höheres Schadensrisiko.

Diese Methode kann auch am Bauwerk angewendet werden. Im Gegensatz zum Labor wurden am Bauwerk keine Unterkühlungen gemessen, was auf die natürliche Präsenz ausreichender Gefrierkeime wie Schnee, Aerosole oder Oberflächen zurückzuführen ist.

Schadensmodell

Aus den vorliegenden Erkenntnissen lässt sich das Gefrieren und Auftauen der Porenflüssigkeit in fünf Phasen aufteilen, die sich durch die jeweils dominanten Schadensmechanismen unterscheiden und einem bestimmten Temperaturbereich zugeordnet werden können.

1. Phase: Beginn der Eisbildung, Temperaturbereich 0 °C bis -5 °C

Die Eisbildung wird an der Oberfläche durch so genannte Gefrierkeime initiiert. Als Gefrierkeime kommen Eis, Schnee und Reifkristalle oder in der Flüssigkeit beim Unterschreiten des Gefrierpunktes spontan gebildete Eispartikel genügender Grösse (= homogene Eisbildung) resp. feste Teilchen, Aerosole oder Teile einer festen Oberfläche (= heterogene Eisbildung) in Frage. Wesentlich für die Schadensbildung in dieser Phase sind die Eisbildungsraten und die Geschwindigkeit des Kristallwachstums. Je höher diese sind, desto grösser wird der hydraulische Druck, der durch die Verdrängung von Porenflüssigkeit bei der Eisbildung entsteht [2]. Kritische Werte werden praktisch nur dann erreicht, wenn die Porenflüssigkeit beim Gefrieren unterkühlt ist.

2. Phase: Eindringen der Eisfront, Temperaturbereich 0 °C bis -10 °C

Wenn die Eisbildung einmal initiiert ist, gefriert die Porenflüssigkeit entsprechend der Beziehung zwischen Gefrierpunkt und Porengröße resp. Salzkonzentration weiter. Es bildet sich eine Eisfront, die ins Poresystem eindringt. Die Salzkonzentration kann durch Salzsegregation lokal erhöht werden. Dabei können ebenfalls

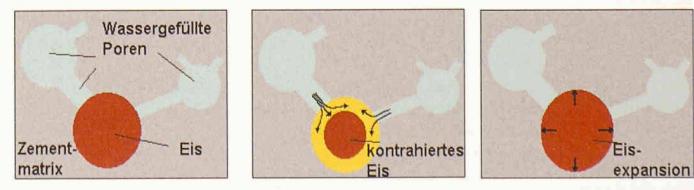
Unterkühlungen auftreten, wenn grobe Poren nur über feinere Poren einen direkten Zugang zu bereits bestehendem Eis besitzen. Dies gilt insbesondere für die Randzonen um grobe Zuschlagskörner oder das Poresystem von frostgefährdeten Zuschlagskörnern. Beim Gefrieren entsteht ein hydrostatischer Druck wie in einem wassergesättigten geschlossenen Behälter [5].

3. Phase: Umverteilung von Porenflüssigkeit, Temperaturbereich zwischen -5 °C und Minimaltemperatur

Durch die Eisbildung wird das Gleichgewicht in der Porenflüssigkeit gestört. Infolge des tieferen chemischen Potentials von Eis strömt Porenflüssigkeit aus den angrenzenden feineren Poren (oder Porenbereichen mit unterkühlter Porenlösung) zum bereits in den gröberen Kapillarporen (oder Eingängen zu Luftporen) gebildeten Eis und gefriert dort. Den gleichen Effekt haben auch die Aufkonzentration der Salzlösung vor der Eisfront (= > Osmose) und der Umstand, dass die thermische Volumenreduktion des Eises wesentlich stärker ist als jene des Porenraumes. Nach Durchschreiten des Temperaturminimums schmilzt die Porenlösung in den feineren Poren zuerst, was eine weitere Umverteilung ermöglicht. Spezielle Versuche haben gezeigt, dass sich durch diese Umverteilung von Flüssigkeit alleine keine Schäden bilden [1].

4. Phase: Auftauen, Temperaturbereich Minimaltemperatur bis 0 °C

Bei der Abkühlung entsteht durch die thermische Kontraktion des Eises zusätzlicher leerer Porenraum. Durch die Umverteilung der Porenflüssigkeit wird dieser wieder mit Eis gefüllt. Bei der Erwärmung dehnt sich das Eis stärker aus als der Zementstein, wodurch sich ein hydrostatischer Druck entwickelt (Bild 5). Dieser wird umso grösser, je tiefer die Minimaltemperatur im Frostwechsel und je stärker die Umverteilung der Flüssigkeit in der 3. Phase war [7].



5

Thermische Kontraktion des Eises bei Temperaturerniedrigung (1) und Wiedersättigung mit Wasser, das dann gefriert (2). Dies induziert Zugspannungen in der anschliessenden Zementsteinmatrix, wenn die Temperatur wieder steigt und das Eis expandiert (3)

5. Phase: Flüssigkeitsaufnahme,

Temperatur > 0 °C

In der Tauphase werden die beim Frostwechsel neu entstandenen oder aufgeweiteten Hohlräume (Risse usw.) wieder mit Wasser gefüllt. Dadurch wird der lokale Sättigungsgrad gerade an diesen kritischen Stellen erhöht und die Voraussetzung dafür geschaffen, dass die Wirkung eines weiteren Frostwechsels verstärkt wird. Diese Phase bewirkt selbst keine Schäden, ist aber für den weiteren Schadensverlauf ausschlaggebend. Wie Versuche gezeigt haben, entstehen kaum zusätzliche Schäden, wenn die Temperatur den Schmelzpunkt nie überschreitet oder keine Flüssigkeit zum Nachtransport zur Verfügung steht.

Schematische Darstellung des Fünf-Phasen-Schadensmodells

Im Laufe eines Frostwechsels (mit Tauphase) mit ausreichend tiefer Minimaltemperatur werden alle Phasen durchlaufen (Abbildung 6 grosser Kreis). Alle fünf Phasen tragen zur Schadensbildung bei. Mit zunehmender Schädigung kann sich der Einfluss einzelner Phasen verstärken. So wird zum Beispiel die Volumenausdehnung des Wassers in Mikrorissen bei der Eisbildung mit zunehmender Anzahl Frostwechsel eine immer wichtigere Rolle bei der Schädigung spielen.

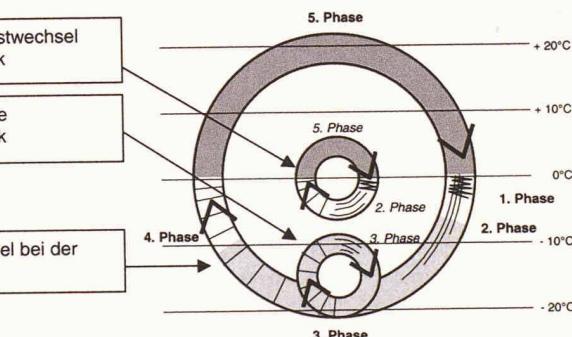
In der Laborprüfung durch ein Schnellbewitterungsverfahren sind obige Voraussetzungen erfüllt: alle Phasen tragen zur Schadensbildung bei. Dabei werden bei verschiedenen in der Schweiz angewandten Prüfmethoden die einzelnen Phasen mehr oder weniger stark gewichtet. So gibt es Prüfverfahren, bei welchen die Unterkühlung eine entscheidende Rolle spielt.

Im vorgestellten Modell hat das Tausalz bei den verschiedenen Phasen schadensvermehrnde wie auch schadensmindernde Einflüsse [1]. Einerseits wird durch das Tausalz, ähnlich wie durch die Porengröße, der Gefrierpunkt erniedrigt, was dazu führt, dass die zweite Phase stark beschleunigt abläuft. Infolge der Salzsegregation entstehen auch mehr geschlossene Behälter [5]. Zudem führen in der vierten Phase Osmoseeffekte zu einer zusätzlichen Sättigung. Dies ergibt eine Verstärkung der Schadensbildung. Andererseits führen hohe Tausalzkonzentrationen dazu, dass ein Teil der Porenlösung erst unterhalb der eutektischen Temperatur (-21°C) gefriert kann. In der Summe dieser verschiedenen Effekte ist die Schädigung bei einer Tausalzbeanspruchung grösser als bei einer reinen Frostbeanspruchung. Es ergibt sich ein Schädigungsmaximum bei Verwendung einer ca. 3%-igen NaCl-Lösung.

Am Bauwerk (Bild 6, kleine Kreise) fallen die Minimaltemperaturen der häufigsten Frostwechsel, verursacht durch den Tag-Nacht-Wechsel, kaum unter -5°C . Unterkühlungen treten kaum auf. Zudem ist nicht immer genügend Feuchtigkeit für den Nachtransport vorhanden. Daher sind hier hauptsächlich die Phasen 2 und 5 am Schadensprozess beteiligt [8]. Während einer Kälteperiode steigt die Temperatur nicht über 0°C . Das Eis taut nicht auf, und es gibt keinen Flüssigkeitsnachtransport. Nur die dritte Phase, ohne nennenswerte Schadensbildung, ist beteiligt.

Es ergibt sich somit eine Diskrepanz zwischen der Prüfung im Labor und dem Verhalten am Bauwerk. Die Schadensmechanismen bei der Prüfung entsprechen nicht genau dem vorherrschenden Schadensmechanismus am Bauwerk. Die Frost-Tausalz-Beständigkeit des Bauwerksbetons wird bei der Laborprüfung nur annähernd richtig beurteilt.

Dr. Josef Kaufmann, dipl. phys. ETH, Rebhalde 2,
8152 Opfikon; Josef.Kaufmann@empa.ch



6
Vergleich der Beanspruchung am Bauwerk
mit jener bei der Prüfung

Anmerkungen / Literatur

- [1] Die Untersuchungen wurden vom Bundesamt für Strassen (FA 81/95) und von der Cemsuisse massgeblich unterstützt. S. Kaufmann J.: Experimental Identification of Damage Mechanisms in Cementitious Porous Materials on Phase Transition of Pore Solution under Frost Deicing Salt Attack. Thèse EPF Lausanne No 2037 (1999).
- [2] Powers T.C., Helmuth R.A.: Theory of Volume Changes in Hardened Cement Paste During Freezing. Proc. Highway Res. Board Vol.32 (1953), p. 285.
- [3] Setzer M.: Freeze Thaw and Deicing Salt Resistance combined with Water and Chloride uptake. Proc. int Conf. on Mass-Energy Transfer and Deterioration, Paris (1995).
- [4] Bager D., Sellevold E.: Ice Formation in hardened Cement Paste, Part 1+2. Cem. and Concr. Res. 16 (1986), p. 706ff, p. 835ff.
- [5] Beddoe R., Setzer M.: Änderung der Zementsteinstruktur durch Chlorideinwirkung. Forschungsberichte aus dem Bauwesen 48 (1990), Uni Essen.
- [6] Fagerlund G.: Internal frost attack – state of the art in frost resistance of Concrete. Proc. RILEM Workshop Frost Resistance of Concrete, Essen (1997).
- [7] Grübl P.: Über die Rolle des Eises im Gefüge zementgebundener Baustoffe. Beton 31 H. 2 (1981), p. 56ff.
- [8] Kaufmann J., Studer W.: Schadensmechanismen bei der Frost-Tausalz-Beanspruchung von Beton. Bericht Forschungsauftrag 81/95 Bundesamt für Strassen Nr. 548 (2000).