Zur Frost-Tausalz-Beständigkeit von Beton

Autor(en): **Rösli, Alfred / Harnik, Avo B.**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizer Ingenieur und Architekt**

Band (Jahr): **97 (1979)**

Heft 46

PDF erstellt am: **28.03.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-85578

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Zur Frost-Tausalz-Beständigkeit von Beton

Von Alfred Rösli und Avo B. Harnik, Zürich

Seit einigen Jahren verfolgen viele Strassenunterhaltsdienste im Winter die Devise «Schwarzräumung», d.h. die konsequente Räumung von Schnee und Eis auf den Verkehrswegen. Zu diesem Zweck kommen grosse Mengen chemischer Enteisungsmittel zur Verwendung, und zwar in erster Linie Natriumchlorid, in kleinerem Umfang aber auch Kalziumchlorid. Dieses Vorgehen hat aber neben allen positiven Folgen hinsichtlich der Befahrbarkeit der Strassen unbestrittenermassen auch negative Auswirkungen, so zum Beispiel auf die Korrosionsbeständigkeit von Fahrzeugen, auf den Umweltschutz und insbesondere auch auf die Betonbeständigkeit. Die Schadenwirkung an Bauwerken aus Beton hat vor allem an Brücken, Brüstungen, Stützmauern, Belägen usw. zugenommen und setzt sich auch heute noch fort. Teilweise sind selbst Stellen betroffen, die früher – ohne Tausalzeinwirkung – anscheinend eine gute Frostbeständigkeit aufwiesen.

Bei der Abklärung der Schadensbildung durch chemische Enteisungsmittel führen vorwiegend *phänomenorientierte Studien leider häufig nicht weiter*, wie sich im Laufe jahrzehntelanger Untersuchungen im In- und Ausland erwiesen hat. Die wesentlichsten Gründe dafür sind das sehr *komplexe Ineinandergreifen* vieler an der Schadenentstehung mitbeteiligter Faktoren – u.a. Witterung, Verkehr, Materialzustand usw. – sowie der Umstand, dass *Prüfbedingungen im Labor häufig nicht praxisnah genug* sind. Daher wurde der Versuch unternommen, die an der Schadenentstehung mitwirkenden Faktoren auf *naturwissenschaftlicher Basis* grundlegend zu untersuchen.

Im folgenden werden zunächst die in diesem Forschungsprogramm bisher gewonnenen theoretischen und praktischen Erfahrungen mitgeteilt. Gestützt auf diese Erkenntnisse wird sodann versucht, konkrete Massnahmen zur Schadenverhütung vorzuschlagen.

Physikalische Gesichtspunkte der Schadenentstehung

Bei den *visuell* wahrnehmbaren Schäden handelt es sich in erster Linie um *blättrige Ablösungen*, die sich stellenweise zu grösseren, flächenhaften *Abschälungen* ausweiten können (Bild 1). Seltener werden auch Abwitterungen bis zu mehreren Zentimetern Tiefe festgestellt [1] (Bild 2).

Im folgenden werden einige der wichtigsten Schadenfaktoren eingehend diskutiert.

Porengrösse

Beton ist ein poröser Baustoff (Bilder 3, 4) [2]. Der Grössenunterschied zwischen den kleinsten und den grössten in ihm enthaltenen Hohlräumen – Gel-, Kapillar- und Luftporen, Rissen usw. – beträgt mehr als sechs Grössenordnungen (Bild 5, oben). Die physikalischen Eigenschaften von Beton, besonders auch seine Widerstandsfähigkeit gegenüber Frost- und Frost-Tausalz-Einwirkungen, beruhen nun in wesentlichem Ausmass auf der absoluten Grösse und auf dem Grössenverhältnis der in ihm vorhandenen Hohlräume.

Gefrierbares Wasser

Wird feuchter Beton abgekühlt, gefriert nicht das gesamte in ihm enthaltene Wasservolumen schon bei 0 °C. Dies hat hauptsächlich zwei Gründe:

a) Die Gefriertemperatur des Wassers im Beton liegt normalerweise schon unter 0 °C, weil dieses Wasser praktisch nie chemisch rein ist, sondern verschiedene lösliche Substanzen – meistens in niedriger Konzentration – enthält, beispielsweise Alkalien, freien Kalk oder Tausalze.

b) Die Umwandlungstemperatur Wasser-Eis ist zudem in engen Kapillaren infolge starker Wechselwirkun-

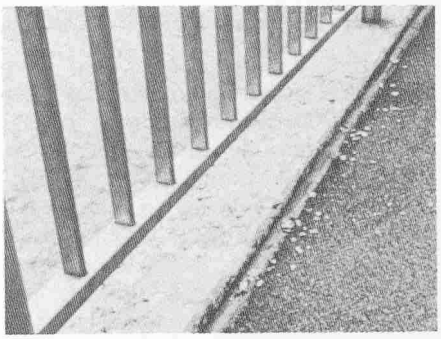


Bild 1. Blättrige Ablösungen haben sich stellenweise zu grösseren flächenhaften Abschälungen ausgeweitet. Vorfabriziertes Randbordelement aus BH 300 mit Dichtungsmittel. 1 Jahr nach Inbetriebnahme, 3 Jahre nach Erstellung

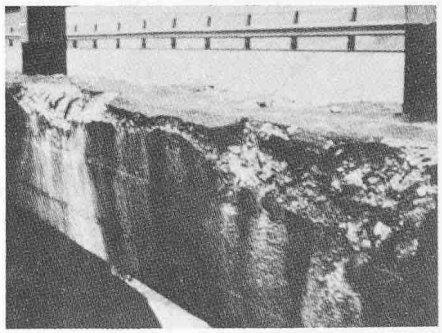


Bild 2. Tiefergehende Betonschäden an Kordonaussenseite. Armierungseisen sind freigelegt

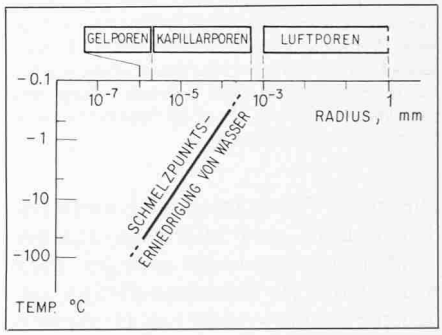


Bild 5. Oben: Porengrössen in Beton
Unten: Beziehung zwischen Porengrösse und Schmelztemperatur von Wasser

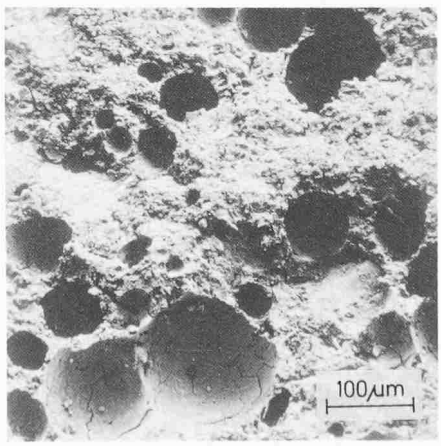


Bild 3. Kugelförmige Luftporen in Beton. Aufnahme einer Betonbruchfläche mit dem Rasterelektronenmikroskop. Beton PC 300, w/z 0,47, 4,4 Prozent Luftporen, $\beta_{d_{28}} = 39{,}3\ N/mm^2$, 2 Jahre alt [2]

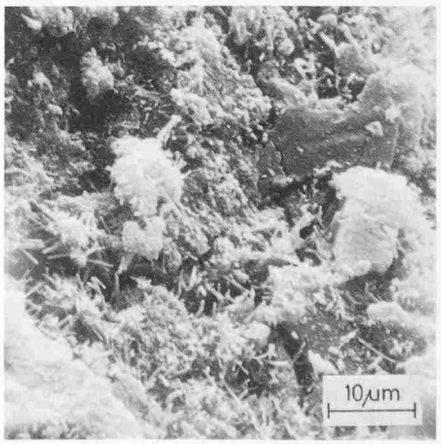


Bild 4. Zementgel: Miteinander verfilzte stengelige wie auch gröbere massige Hydratationsprodukte als Beispiel für die Vielzahl der möglichen Erscheinungsformen. Vergrösserter Ausschnitt aus Bild 3

gen zwischen den Kapillarwandungen und den Wassermolekülen zusätzlich erniedrigt (vgl. die Kurve in Bild 5, unten).

Hydrodynamischer Effekt (hydraulischer Druck)

Gefriert Wasser im Beton, müssen rund 9 Prozent des Wasservolumens in wasserfreie Poren oder an die Betonoberfläche gepresst werden. Ist diese Expansion behindert, entsteht ein Innendruck (hydraulischer Druck), dessen Grösse vor allem von der Kristallisationsgeschwindigkeit des Eises abhängt und theoretisch einen Maximalwert von rund 200 N/mm² erreichen kann (Bild 6).

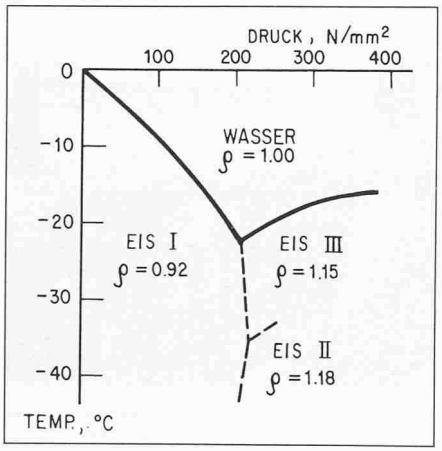


Bild 6. Phasendiagramm H_2O, wenn eine Expansion des Wassers unmöglich ist (konstantes Volumen). Die Kurve zwischen den Bereichen «Wasser» und «Eis I» gibt an, wie der Druck in einem abgeschlossenen Hohlraum mit sinkender Temperatur zunimmt. ρ: Dichte; I, II und III: drei der vielen bekannten Eismodifikationen

Die in der Praxis tatsächlich auftretenden Drücke sind allerdings anscheinend in der Regel weit geringer, sonst würde kaum ein Betonbauteil die natürlichen Frosttauwechsel heil überstehen. Der Hauptgrund dafür dürfte sein, dass die Geschwindigkeit des Eiswachstums im Beton unter natürlichen Frostbedingungen begrenzt ist. Das Wasser gefriert nämlich weder schlagartig noch überall gleichzeitig, sondern nur so rasch, wie die dabei freiwerdende Schmelzwärme des Eises im Beton abgeleitet wird. In diesem Zusammenhang sei schon auf Bild 12d hingewiesen, in dem diese zeitliche Verzögerung sichtbar wird; die Darstellung zeigt, dass die Temperatur am Ort des Gefrierens trotz fortgesetzter Abkühlung von aussen her so lange auf 0 °C fixiert bleibt, bis sämtliches Wasser zu Eis geworden ist. – Als Folge dieser begrenzten Wachstumsgeschwindigkeit kann Eis auch plastisch fliessen, so dass es in wasserfreie Hohlräume sowie an die Betonoberfläche gepresst werden kann, wodurch der Druck im Innern reduziert wird. Dennoch muss damit gerechnet werden, dass lokal wenigstens kurzzeitig hohe Druckspitzen auftreten, sei es etwa wegen ruckweisen Vorrückens der Eisfront von einer Pore in die nächste, oder sei es, dass «Inseln» von Kapillarwasser von vorrückendem Eis eingeschlossen werden.

Luftporen

Bei der Herstellung von Frost-Tausalz-exponiertem Beton werden in zunehmendem Masse *Luftporen-(LP)-Zusatzmittel* verwendet. Das Einführen von zusätzlichen kugelförmigen Luftporen in den Beton soll den verfügbaren Expansionsraum vergrössern (für das Ausdehnen des gefrierenden Wassers) und es soll die Wassersaugwirkung der Kapillaren im Zementstein und insgesamt Wasseraufnahmegeschwindigkeit und -aufnahmevermögen des Betons reduzieren. Grundsätzlich sind die Erfahrungen mit dieser bis jetzt vor allem für Betonstrassen vorgesehenen Massnahme gut; vgl. diesbezüglich auch die Richtlinien der Betonstrassen AG [3]. Sie sollte deshalb unseres Erachtens auch für alle übrigen Frost-Tausalz-exponierten Betonbauteile (Brüstungen, Kordons usw.) Anwendung finden.
In der *Praxis* bereitet es allerdings häufig *Schwierigkeiten,* die *gewünschten Luftporenkennwerte präzise einzustellen* und auch über grössere Zeiträume einzuhalten. Auch eine Alternative, nämlich die Herstellung eines möglichst kompakten, das heisst porenarmen Betons bietet vorderhand in der Baupraxis noch spezielle verarbeitungstechnische Probleme, vor allem wegen der Inhomogenität besonders der Aussenzone von Beton (vgl. den Abschnitt «Inhomogenität der Betonaussenzonen»).
Es wurde daher auch schon vorgeschlagen, den benötigten Expansionsraum in Form von porösen Feststoffpartikeln in den Beton einzubringen, um so die Probleme zu eliminieren, die sich aus der Instabilität und gegebenenfalls auch aus dem festigkeitsreduzierenden Effekt von eingeführten Luftporen ergeben [z.B. 4, 5]. Die bisherigen Versuche zeigten anscheinend eine viel höhere Beständigkeit der Betonproben, verglichen mit normalem Beton mit eingeführten Luftporen.

Kapillarer Effekt

Offensichtlich können nicht sämtliche Frostschäden auf der Wasserexpansion beim Gefrieren beruhen; ähnliche Schäden an Zementstein wurden nämlich auch mit Flüssigkeiten wie beispielsweise Benzol beobachtet, die beim Gefrieren kontrahieren [6]. In solchen Fällen basiert die Schadenbildung auf dem sogenannten kapillaren Effekt, der in allen porösen Körpern mit *verschieden grossen* Poren bzw. Kapillaren vorkommen kann.
Zur leichteren Vorstellung der Wirkungsweise des kapillaren Effektes stelle man sich vor, Zementstein werde unter 0 °C abgekühlt (Bild 7). Zuerst wird dann das Wasser in den Kapillarporen zu Eis gefrieren, während es in den viel engeren Gelporen flüssig bleibt. Dies folgt aus der (in Bild 5 unten dargestellten) Gesetzmässigkeit, dass sowohl die Schmelz- wie auch die Gefriertemperatur von Wasser in sehr engen Poren mit abnehmendem Porendurchmesser

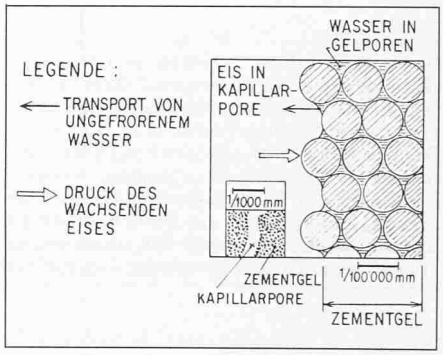


Bild 7. Druckerzeugung durch den kapillaren Effekt (schematisch nach [7]). Beschreibung siehe Abschnitt «Kapillarer Effekt»

sinkt. Es bildet sich also ein Zustand aus, in dem *neugebildetes Eis (in den Kapillarporen) und flüssiges Wasser (in den Gelporen) nebeneinander existieren.* Wegen des ungleichen Dampfdruckes von Eis und Wasser entsteht dadurch jedoch ein *thermodynamisches Ungleichgewicht,* so dass dieser Zustand nicht stabil ist. Zum Ausgleich setzt deshalb ein Transport von ungefrorenem Wasser aus den Gelporen zum Eis in den Kapillaren ein, wo es dann – wegen deren grösserem Durchmesser – unmittelbar gefrieren kann. Demzufolge wächst das Eisvolumen allmählich, selbst wenn die Aussentemperatur nicht weiter sinkt, so dass der Eisdruck auf die umgebenden Zementsteinwände steigt. Für eingehende Berechnungen sei auf [8] verwiesen. – Übrigens beruht die Entstehung von *Eislinsen* in Böden auf einem ähnlichen Vorgang [9].
Auch die Bildung von *Salzkristallen* in grösseren Poren des Zementsteins kann in ähnlicher Weise zur Entstehung eines sogenannten *Kristallisationsdruckes* führen [10]. Dazu muss im Beton eine übersättigte Salzlösung vorhanden sein, was sowohl durch Verdunsten von Wasser aus einer ungesättigten Lösung (bei Erwärmung) als auch durch Gefrieren eines Teils des Porenwassers aus einer ungesättigten Lösung (bei Abkühlung) geschehen kann. Das Salz beginnt dann in den Kapillarporen zu kristallisieren, analog wie oben das Eis. Zum Ausgleich dieses instabilen Zustandes werden Salzionen aus den kleineren Gelporen zu den wachsenden Salzkristallen in den Kapillarporen transportiert, wodurch der Kristallisationsdruck auf die umgebenden Zementsteinwände zunimmt.

Temperaturschock und Eigenspannungen

Der Name Temperaturschock bezeichnet den rapiden Temperatursturz in einer eisbedeckten Betonoberfläche beim Auftauen des Eises mit Tausalzen. Die zum spontanen Eisschmelzen erforderliche Wärmemenge wird dem Beton entzogen, so dass dessen Oberfläche rasch abkühlt. Bild 8 zeigt ein typisches

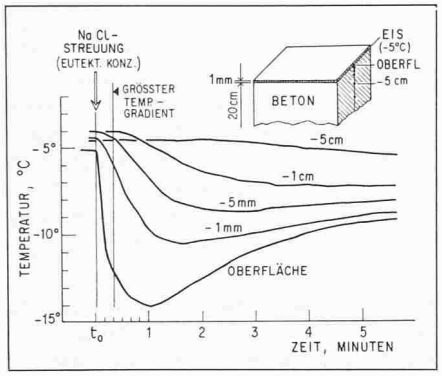


Bild 8. Temperaturschock: Typisches Temperaturprofil in einer eisbedeckten, 20 cm dicken Betonplatte (1mm Eis, -5 °C) während des Auftauens mit Natriumchlorid (eutekt. Konzentration) [11]

Beispiel aus einer Laborversuchsserie für den entstehenden thermischen Gradienten. Solche Temperaturgradienten führen bekanntlich zur Entstehung innerer Zug- und Druckspannungen im

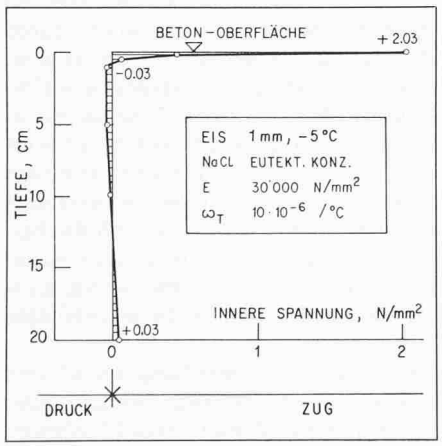


Bild 9. Spannungsverteilung (berechnet): Innere Spannungen infolge Temperaturschock in einer 20 cm dicken Betonplatte 20 Sekunden nach der Salzstreuung [12]. Gleicher Versuch wie in Bild 8

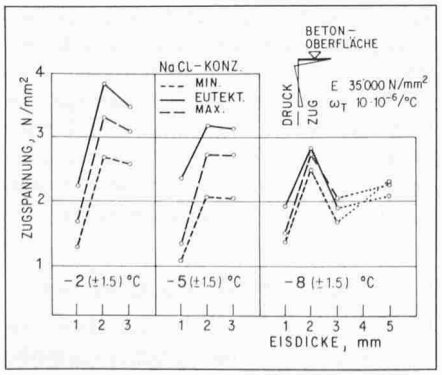


Bild 10. Berechnete Eigenspannungen (offene Kreise) infolge Temperaturschocks an der Oberfläche einer 20 cm dicken Betonplatte [12]

Beton. Diese können mit den aufgezeichneten Temperaturprofilen berechnet werden. Bild 9 zeigt ein Beispiel für eine solche Spannungsverteilung in einer Betonplatte, und in Bild 10 sind die berechneten Eigenspannungen aus einer grösseren Versuchsserie dargestellt.

Anhand dieser Resultate kann zum Einfluss des Temperaturschocks auf die Betonbeständigkeit folgendes gesagt werden:

a) Grosse Temperaturgradienten sind höchstens in den ersten wenigen Minuten nach einer Salzung zu erwarten (vgl. Bild 8).
b) Das Auftreten gefährlicher Spannungen ist auf eine relativ dünne äusserste Zone des Betons (wenige Millimeter) beschränkt (vgl. Bild 9).
c) Die berechneten Eigenspannungen an der Betonoberfläche (Zugspannungen) waren in der Grössenordnung von 1 bis 4 N/mm² (vgl. Bild 10), d.h. in der Grössenordnung der Betonzugfestigkeit.

Wir vermuten, dass solche *Zugspannungen* an der Betonoberfläche *Mikrorisse* im Beton verursachen können und dass schliesslich die geschwächte oberste Betonschicht bei wiederholten Frost-Tau-Wechseln relativ leicht abgesprengt wird, sei es durch den hydrodynamischen oder/und kapillaren Effekt.

In den erwähnten Laborversuchen wa-

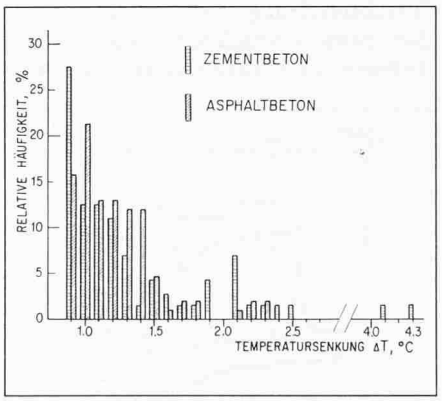


Bild 11. Temperaturschock infolge Natriumchloridstreuung in Zement- und Asphaltbeton; nur Temperatursenkungen von 0,9 °C und mehr sind dargestellt.
Dübendorf bei Zürich, 450 m.ü.M., Winter 1975/76 und 1976/77 [13]

ren verschiedene Variable wie etwa Wind, Verkehr usw. nicht berücksichtigt. Deshalb wurden zur Ergänzung ähnliche Messungen an Zement- und Asphaltbeton während zweier Winter in einer verkehrsreichen Strasse durchgeführt [13]. Der grösste während dieses Zeitraumes registrierte Temperaturschock betrug 4,3 °C (Bild 11). Dieser relativ niedrige Wert ist vermutlich die Folge der konsequenten Durchführung der Präventivsalzung in der Praxis. Immerhin betragen aber die berechneten Eigenspannungen (Zugspannungen) auch für so kleine Temperatursenkungen noch etwa 1,3 N/mm². Daraus zie-

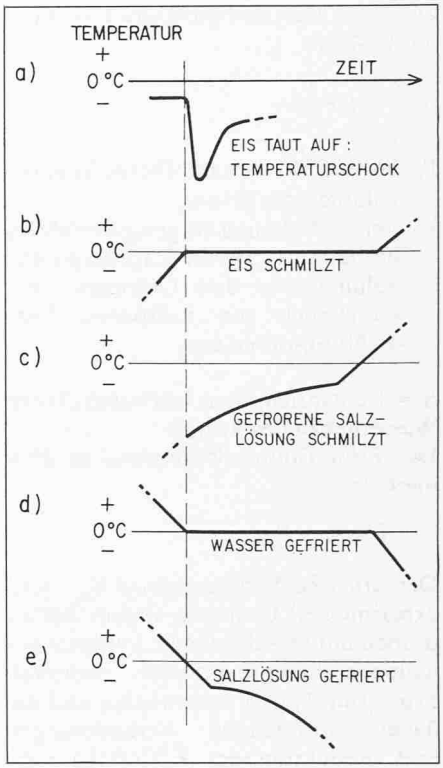


Bild 12. Messungen des Temperaturverlaufs an der Betonoberfläche unter verschiedenen Bedingungen (schematisch dargestellt aufgrund von Versuchen).
a) Schmelzen von Eis mit Tausalz
b) Natürliches Schmelzen von Eis, ohne Tausalze
c) Natürliches Schmelzen von gefrorener Salzlösung
d) Natürliches Gefrieren von Wasser
e) Natürliches Gefrieren von Salzlösung

hen wir den Schluss, dass auch in der Praxis der Temperaturschock lokal zur Entstehung von Mikrorissen und in der Folge zu lokalisierten Schäden führen kann.

In zusätzlichen Versuchen wurde abgeklärt, ob auch unter natürlichen Witterungsbedingungen - also ohne Temperaturschock - ähnliche Temperaturgradienten vorkommen können. Der Vergleich der Ergebnisse (Bild 12) lässt erkennen, dass beim Eisauftauen mit Tausalzen (Bild 12a) der grösste thermische Gradient (Kurve mit der grössten Kurvenneigung) entsteht. Die *Verhütung des Temperaturschocks in der Praxis scheint uns daher ein wichtiger Beitrag zur Erhöhung der Frost-Tausalz-Beständigkeit von Beton* zu sein.

Im übrigen sei noch darauf hingewiesen, dass der Temperaturschock die bei Frost im Betoninneren befindliche 0 °C-Grenze noch weiter ins Innere hinein verlegen kann. Dadurch können auch solche Bereiche des Betons in Gefriergefahr geraten, die unter natürlichen Bedingungen kaum frostgefährdet sind, und es kann von innen her zum Abplatzen der äusseren Betonschichten kommen.

Wassersättigungsgrad

Es hat sich gezeigt, dass der jeweilige Wassersättigungsgrad eines Betons von grosser Bedeutung für seine Beständigkeit gegenüber Frost-Tausalz-Einwir-

kung ist. Der Sättigungsgrad ist definiert [14] als

$$(1) \qquad S = \frac{V_w}{V_p}$$

V_w bei 105 °C verdampfbares Wasservolumen des Betons.
V_p durch Vakuumsättigungsverfahren bestimmtes offenes Kapillarporenvolumen vor dem Gefrieren, einschliesslich von Luftporen, Verdichtungsporen usw.

$S = 1$ entspricht dem höchstmöglichen Wassergehalt des Betons.
Der *Frost-Tausalz-Widerstand* ist definiert als

$$(2) \qquad F = S_{krit} - S_{kap}$$

Der *kritische Sättigungsgrad* S_{krit} wird experimentell bestimmt, indem Betonproben mit verschiedenen, konstant gehaltenen Sättigungsgraden mehreren Frost-Tau-Zyklen unterworfen und die dabei auftretenden Veränderungen (z.B. Reduktion des *E*-Moduls) registriert werden. Normalerweise nehmen diese Veränderungen mit steigendem *S*-Wert allmählich zu, um schliesslich oberhalb eines bestimmten Wertes, der als S_{krit} bezeichnet wird, überproportional stark anzuwachsen. Der kapillare *Sättigungsgrad* S_{kap} wird bestimmt, indem mehrere gleich vorgelagerte Betonproben während verschieden langen Zeiten in Kontakt mit Wasser gebracht werden und die Gewichtszunahme gemessen wird. Die anfangs rasche Wasseraufnahme geht von einem bestimmten Zeitpunkt an merklich langsamer vor sich, und der dieser Zeit entsprechende Sättigungsgrad wird als S_{kap} definiert. S_{krit} wird als weitgehend unabhängig von äusseren klimatischen Bedingungen betrachtet und kann daher als *eine Materialkonstante* angesehen werden. S_{kap} dagegen ist abhängig von den Einsatzbedingungen des Materials (Exponiertheit usw.), den Umgebungsbedingungen (Klima) und der Dauer der Beanspruchung.
Der *Frost-Tausalz-Widerstand* eines Betons ist gemäss Gl. (2) umso grösser, je grösser *F* ist, d.h. je grösser die Differenz ist zwischen dem kritischen Sättigungsgrad und dem grösstmöglichen zu erwartenden Sättigungsgrad S_{kap} (aufgrund der Einsatzbedingungen, des Klimas und der zugrundegelegten Lebensdauer). Tausalze haben in dieser Hinsicht einen negativen Einfluss, weil sie hygroskopisch sind, d.h. noch mehr Wasser anziehen; dies konnte experimentell nachgewiesen werden [15]. Ein Hinweis darauf ist auch die bekannte Tatsache, dass gesalzene Strassen länger nass bleiben als salzfreie.
Einen Beton beständig gegen Frost-Tausalz zu machen, bedeutet daher, sein Wasseraufnahmevermögen dermassen zu reduzieren, dass der kritische Sättigungsgrad unter den gegebenen Umständen nicht erreicht wird. Massnahmen dazu sind insbesondere: Herstellen einer dichten Betonoberfläche; Einführen von Luftporen, die die Saugfähigkeit des Betons reduzieren; bei extremen Anforderungen zusätzliche Abdichtung des Betons von aussen her (Beschichtung, Imprägnierung usw.).
Zur Untersuchung des Einflusses des Wasserhaushaltes auf die Festigkeiten von Betonprobekörpern haben wir kürzlich besondere Versuche durchgeführt [16].

Unterkühlung

Unter Unterkühlung wird die Erscheinung verstanden, dass Wasser beim Abkühlen infolge fehlender Kristallisationskeime (Eiskristalle, Fremdkörper usw.) nicht bei 0 °C, sondern durch sogenannte *spontane Keimbildung* erst mehr oder weniger weit unterhalb 0° gefriert. Dieser Effekt ist somit nicht zu verwechseln mit der Gefrierpunktserniedrigung von Wasser durch gelöste Salze oder mit der Gefriertemperatursenkung von Wasser in engen Kapillaren (vgl. Bild 5 unten). Unterkühlung kann im Gegenteil gleichzeitig mit und zusätzlich zu den genannten beiden Phänomenen auftreten. Voraussetzung für das Auftreten von Unterkühlung bei Beton ist, dass die Betonoberfläche eisfrei ist, wie dies beispielsweise durch die Präventivsalzung bewirkt wird.
Ziel einer Versuchsserie war es, das *Ausmass* der Unterkühlung in Zementstein zu bestimmen. Bild 13 zeigt die Ergebnisse von DTA-Messungen (Differential-Thermo-Analyse) mit wassergesättigtem Zementstein [17]. Die Eisbildung an der Oberfläche wurde verhindert durch Bedecken der Probekörper mit diversen Flüssigkeiten und Pulvern (Kalziumchloridlösung, Silikonöl, AgI- und Al_2O_3-Pulver). Wie die Figur zeigt, begann das unterkühlte Porenwasser im Probeninneren etwa zwischen −12 und −16 °C zu gefrieren (vgl. die nach oben gerichteten Spitzen der Kurven), mit Ausnahme der mit Silberiodid bedeckten Proben (ca. −5 °C, vermutlich wegen der Keimbildungsbeschleunigung durch das Silberiodid). Hingegen schmolz in allen vier dargestellten Fällen das Poreneis nahe bei 0 °C (vgl. die nach unten gerichteten Kurvenspitzen). Dieser Umstand beweist die oben gemachte Feststellung, dass die Unterkühlung unabhängig ist von gelösten Stoffen oder dem Porendurchmesser.
Die Folgerung aus diesen Resultaten ist zunächst einmal die, dass die Unterkühlung eine günstige Auswirkung auf die Betonbeständigkeit haben dürfte, weil bei Fehlen von Eis an der Oberfläche (z.B. durch Präventivsalzung) auch das Gefrieren des Porenwassers schon bei 0 °C weitgehend verhindert wird. Hingegen besteht natürlich die Möglichkeit, dass dieses unterkühlte Porenwasser bei einer besonders grossen Abkühlung, beispielsweise in strengen Ausnahmewintern, oder auch durch den Temperaturschock bis zur Temperatur der spontan einsetzenden Keimbildung abgekühlt wird. Eine solche Situation kann deswegen gefährlich werden, weil die Kristallisationswärme des Eises vom sehr kalten Beton besonders rasch abgeleitet wird, wodurch die Eiswachstumsgeschwindigkeit und daher schliesslich auch der Innendruck grösser werden können als beim normalen Gefrieren.
In diesem Zusammenhang sei an den ungewöhnlich langen, kalten und schneereichen Winter 1962/63 erinnert (in der Schweiz Winter der «Seegfrörni»), in dem Abwitterungen vor allem an tausalzbestreutem Beton (Fahrbahnen, Trottoirplatten u.a.) gehäuft in Erscheinung traten. In jenem Winter wurden Strassen und Gehwege besonders häufig mit Tausalzen bestreut. Wir vermuten, die grossen Schäden seien darauf zurückzuführen, dass infolge der Kombination von anfänglicher Unterkühlung und darauf folgender ausserordentlicher Kälte auch tiefere Zonen des Betons als gewöhnlich gefroren.

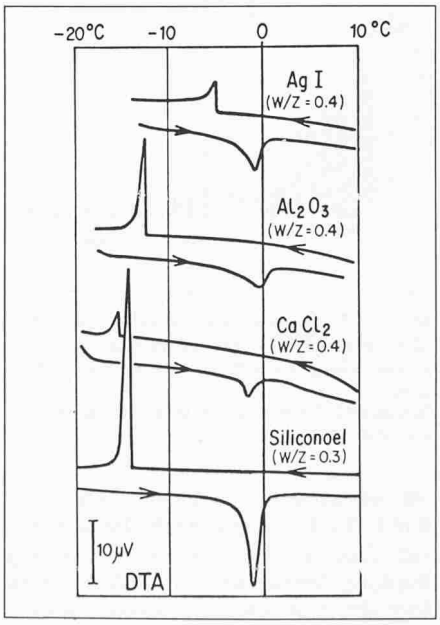


Bild 13. Unterkühlung des Porenwassers in wassergesättigtem Zementstein (Wasser/Zementfaktor w/z = 0,3 und 0,4), in Abhängigkeit von verschiedenen, die Proben allseitig bedeckenden Substanzen, die eine Eisbildung an der Probenoberfläche verhindern sollen [17]. $CaCl_2$: 31%-Lösung. Die Kurven zeigen die differentialthermoanalytisch (DTA) gemessenen Wärmetönungen der Vorgänge im Probeninneren.
Obere Kurven: Abkühlung; Spitze = Gefrieren des Porenwassers.
Untere Kurven: Erwärmung; Spitze = Schmelzen des Poreneises

Inhomogenität der Betonaussenzonen

Beim Betonieren werden im Beton an der Einfüllfläche und in Schalungsnähe die grösseren Zuschlagstoffe verdrängt, so dass es dort zu einer Anreicherung von Wasser, Zement und Feinstoffen

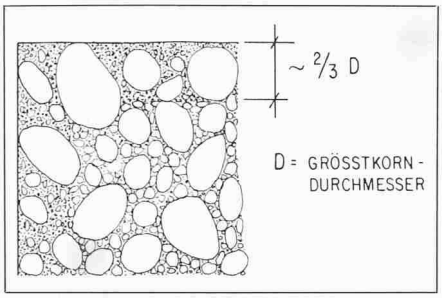


Bild 14. Inhomogenität im Aufbau von Beton: Die Aussenzonen von ca. 2/3 D Dicke (D = Grösstkorndurchmesser) sind angereichert an Porenraum und Feinbestandteilen

kommt. Daher muss man sich den Aufbau von Beton gegen die Oberfläche hin als inhomogen vorstellen (Bild 14). Dementsprechend ändern sich beim Übergang vom Kern- zum Randbeton verschiedene Betoneigenschaften, u.a. *w/z*-Wert, Porosität, Festigkeit, *E*-Modul, Wärmeausdehnungskoeffizient usw. Es können deshalb zwischen dem Kernbeton und der Randzone bei einer *Änderung äusserer Einflüsse* - z.B. Spannung, Temperatur, Feuchtigkeit - *innere Spannungen* entstehen, die zur Bildung von Mikrorissen und gegebenenfalls von weitergehenden Schädigungen wie Abplatzungen und dergleichen beitragen können.

Schichtweises Gefrieren

Unter schichtweisem Gefrieren verstehen wir die Erscheinung, dass der Beton *beim Abkühlen nicht sofort als Ganzes gefriert*, sondern zunächst nur in relativ dünnen Zonen oder Schichten, die mehr oder weniger parallel zur Oberfläche liegen. Dieser Vorgang ist teilweise eine Folge der oben erwähnten Inhomogenität des Betons, vor allem wegen der variierenden Porosität. Dabei wird von der Tatsache ausgegangen, dass in relativ oberflächennahen Betonzonen häufig lokal grössere Änderungen des Wassergehalts bzw. der Salzkonzentration auftreten (Bild 15 und 16). Wird Beton in einem solchen Zustand abgekühlt, so setzt die Eisbildung zuerst in den besonders wasserreichen bzw. in den salzarmen Zonen ein. Es liegen dann (schon) gefrorene und (noch) ungefrorene Zonen oder Schichten im Beton nah beieinander. Der Übergang von der einen zur anderen Schicht erfolgt umso unmittelbarer, je grösser der Gradient des Wassergehalts bzw. der Salzkonzentration ist. Dementsprechend kann es auch in diesem Fall zur Entstehung *innerer Spannungen* kommen, nämlich zwischen gefrorenen und ungefrorenen Schichten, und schliesslich können sich daraus Absprengungen des Betons entwickeln [18].

Osmotischer Effekt

Der von *Powers* eingeführte sogenannte osmotische Effekt bei der Schadensbildung im Beton [19] beruht auf hypothetischen Annahmen über die physikalischen Eigenschaften des Zementsteins. So soll der Zementstein u.a. die *Funktion einer semi-permeablen Membran* übernehmen können. Eingehende Überlegungen [20] führen jedoch zum Schluss, dass die mit osmotischen Vorgängen verbundene *Ionendiffusion* (z.B. der Chloridionen) im Beton viel zu langsam vorsichgeht, als dass ein solcher Vorgang einen nennenswerten Beitrag zu den anderen druckerzeugenden Mechanismen liefern könnte: «Abgesehen von solchen Überlegungen, die dem osmotischen Druck höchstens eine untergeordnete Rolle beimessen, fehlen bis heute experimentelle Untersuchungen, die eindeutig auf die Existenz osmotischer Vorgänge im Fall von Lösungen der gebräuchlichen Tausalze (hauptsächlich NaCl) schliessen lassen. Es muss daher vorläufig noch Ermessenssache bleiben, ob dem osmotischen Effekt eine reale Bedeutung bei der Entstehung von Frost-Tausalz-Schäden zugemessen werden soll.»

Folgerungen

Die bisherigen Ausführungen lassen erkennen, dass die Mechanismen der Frost- und der Frost-Tausalz-Schädigung von Beton teilweise wesentlich komplizierter sind, als bisher angenommen wurde. Auch können Schäden im allgemeinen nicht nur einer einzigen Ursache zugeschrieben werden, sondern folgen meistens aus der Kombination mehrerer Ursachen.

Zur Frage, *warum Tausalze den Frostwiderstand von Beton häufig reduzieren*, können wir die folgenden *vorläufigen Schlussfolgerungen* ziehen: Diese Erscheinung ist verschiedenen Faktoren zuzuschreiben, insbesondere dem Temperaturschock, der Unterkühlung, dem Kapillareffekt, der Einwirkung des Wassersättigungsgrades und dem schichtweisen Gefrieren. Einige dieser Faktoren sind aus der Literatur gut bekannt, andere weniger. Wie gross der Anteil jedes Schadensfaktors an einem gegebenen Schaden ist, kann gegenwärtig nicht angegeben werden.

Schliesslich haben unsere Untersuchungen gezeigt, dass die Betonbeständigkeit gegen Frost und Tausalze besonders eng mit der Oberflächenqualität zusammenhängt.

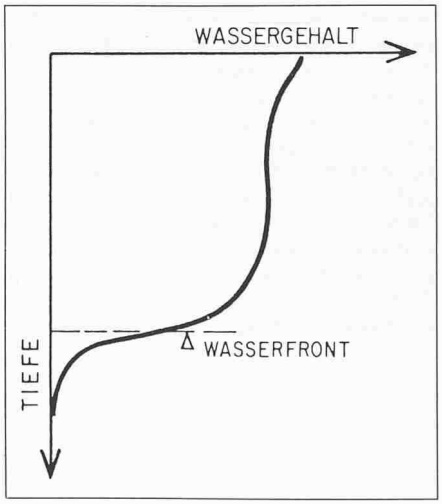


Bild 15. Wassergehalt im Beton beim Eindringen von Wasser in relativ trockenen Beton [18]

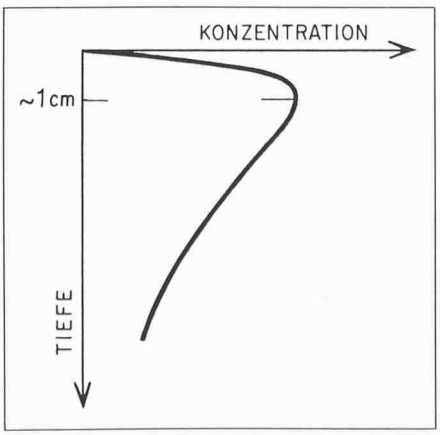


Bild 16. Chloridkonzentration in Beton nach wiederholter Salzstreuung [18]. Die niedrige Oberflächenkonzentration rührt vom Auswaschen durch Schnee, Regen usw. her

Verhütungsmassnahmen

Die obenstehenden Schlussfolgerungen lassen die folgenden Massnahmen als besonders wesentlich zur Verhütung schwerwiegender Frost-Tausalz-Schäden erscheinen.

Projektierung

- Genügende Betonüberdeckung der Armierung;
- Isolation des Bauwerks;
- Entwässerung der Oberflächen und Hohlräume;
- Zugänglichkeit der Hohlräume;
- Berücksichtigung der Erfahrungen des Unterhaltsdienstes.

Ausführung

- Strikte Beachtung der anerkannten Regeln der Betontechnologie zur Herstellung frosttausalzbeständigen Betons;
- Verwendung luftporenbildender Zusatzmittel für frosttausalzgefährdete Betonbauteile. Genaue Kontrolle der Dosierung und des Luftgehaltes am frischen Beton und Kontrolle der wichtigsten Porenkennwerte (z.B. Abstandsfaktor, mittlere spezifische Porenoberfläche, wirksamer Porengehalt u.a.) am erhärteten Beton (vgl. auch [3]);
- Gute Verdichtung und Nachbehandlung zur Erzielung eines möglichst kompakten Betons mit dichter Oberfläche;
- Eventuell zusätzlicher Oberflächenschutz durch Beschichtung, Imprägnierung usw. Zur vorgängig erforder-

lichen Oberflächenreinigung hat sich bis jetzt nur Sandstrahlen eindeutig bewährt.

Winterdienst

- Präventives Salzen;
- Rascher Einsatz, solange Eis- und Schneeschicht noch dünn sind;
- Sparsames Salzen;
- Gleichmässige Salzverteilung.

Unterhalt

Es ist entscheidend, die Bauwerke im Betrieb durch regelmässige Kontrollen zu überwachen und zutage getretene Schäden unverzüglich zu beheben.

Künftige Arbeiten

Immer noch treten Schäden an Beton auf, die auf die Einwirkung von Frost und Tausalzen zurückgeführt werden. Aus diesem Grund ist es notwendig, die Arbeiten weiterzuführen, und zwar mit folgenden Schwerpunkten:

- Mikroskopische Erforschung der Betonstruktur, u.a. mit den Methoden der Stereologie;
- Verbesserung der Oberflächenqualität von Beton;
- Evtl. nachträglicher Schutz von stark exponiertem Beton vor Frost- und Frost-Tausalz-Einwirkung mittels Beschichtung, Imprägnierung, Anstrichen usw.;
- Entwicklung praxisnäherer, zuverlässigerer und schnellerer Methoden zur Bestimmung der Frost- und Frost-Tausalz-Beständigkeit von Beton.

Literatur

[1] *Larsen L.T. (1970):* «Betonstrassen-Schadenverhütung». Betonstrassen AG, Wildegg (Herausgeber), Technische Forschungs- und Beratungsstelle der Schweiz. Zementindustrie, Wildegg.

[2] *Harnik A.B.* (1977): «Frost-Tausalzeinwirkungen auf Beton». SIA-Dokumentation, Bd. 23 «Verhalten von Bauwerken - Qualitätskriterien», 81–91.

[3] *Dobrolubov G. und Romer B.* (1977): «Richtlinien zur Bestimmung und Prüfung der Frost-Tausalzbeständigkeit von Zementbeton». Strasse und Verkehr 63, Nr. 10 und 11.

[4] *Sommer H.* (1977): «Ein neues Verfahren zur Erzielung der Frost-Tausalzbeständigkeit des Betons». Zement und Beton 22, 124–129.

[5] *Litvan G.G. and Sereda P.J.* (1978): «Particulate admixture for enhanced freeze-thaw resistance of concrete». Cement and Concrete Research 8, 53–60.

[6] *Beaudoin J.J. and McInnis C.* (1974): «The mechanism of frost damage in hardened cement paste». Cement and Concrete Research 4, 139–148.

[7] *Miller R.D.* (1973): «The porous phase barrier and crystallization». Separation Sci. 8, 521–535.

[8] *Haynes J.M.* (1968) in: «Low temperature biology of foodstuffs», J. Hawthorn and E.J. Rolfe (editors), Pergamon Press, London, 70–104.

[9] *Jackson K.A. and Chalmers B.* (1958): «Freezing of liquids in porous media with special reference to frost heave in soils». J. Appl. Physics 29, 1178–1181.

[10] *Hansen W.C.* (1963): «Crystal growth as a source of expansion in Portland-cement concrete». Proc. Amer. Soc. Test. Mat. 63, 932–945.

[11] *Harnik A.B. und Rösli A.* (1975): «Temperaturschock beim Auftauen von vereistem Beton mit Tausalz». Schweiz. Bauzeitung 93, 735–739.

[12] *Harnik A.B. und Rösli A.* (1974): «Temperaturschock und Eigenspannungen in Beton unter Frost-Tausalzeinwirkung». Bericht der Professur für Materialwissenschaften, ETH Zürich, 62 S.

[13] *Wenger B. und Harnik A.B.* (1977): «Temperaturmessungen in Strassenbelägen». Strasse und Verkehr 63, 427–432.

[14] *Fagerlund G.* (1977): «The critical degree of saturation method of assessing the freeze/thaw resistance of concrete». RILEM Committee 4 CDC, Tentative Recommendation, Matériaux et Constructions 10/58.

[15] *Wenger B.* (1978): «Aufsaugversuche an Mörtelprismen mit Wasser und Tausalzlösungen». Beton 28, 52–54.

[16] *Notter R. und Studer W.* (1979): «Über Zusammenhänge zwischen Wasserhaushalt und Festigkeiten von Betonprobekörpern». Material + Technik 7, 36–42.

[17] *Meier U. und Harnik A.B.* (1978): «Das Gefrieren von Wasser in Zementstein bei verhinderter Verdunstung». Cement and Concrete Research 8, 545–552.

[18] *Meier U. (1978):* «Die Entstehung von Oberflächenschäden durch das Abkühlen von schichtweise gefrorenem Beton». Material + Technik 6, 92–95.

[19] *Powers T.C.* (1956): «Resistance of concrete to frost at early ages». Proc. RILEM Symp. Winter Concreting, Session C, 1–47.

[20] *Meier U.* (1979): «Die physikalischen Ursachen der destruktiven Wirkung von Frost und Tausalz auf Beton und andere poröse Stoffe». Material + Technik 7, 43–48.

Dank

Diese Arbeit ist eine *Zusammenfassung der bisherigen Resultate des ETH-Forschungsprojektes «Frost-Tausalz-Beständigkeit von Beton»;* ausführliche Hinweise siehe Literaturverzeichnis. Allen Mitarbeitern, die dabei mitwirkten, sei unsere Anerkennung und unser Dank ausgesprochen, vor allem den Herren *B. Wenger*, dipl. Bau-Ing., und *U. Meier* dipl. Natw. Für die Arbeiten standen auch Mittel des Vereins Schweiz. Zement-, Kalk- und Gipsfabrikanten (VSZKGF) zur Verfügung. Wir möchten den Vertretern des Eidg. Amtes für Strassen- und Flussbau (ASF), besonders Herrn *E. Rey*, und zahlreichen Kollegen in vielen Kantonen für ihre uneigennützige Unterstützung dieses Projektes danken. Im besonderen sei auch die Mithilfe von Mitarbeitern der EMPA Dübendorf in verschiedenen Phasen der Arbeit hervorgehoben. Für die Überlassung der Fotos danken wir den Herren *N. Letta* (Bild 1) und *W. Stampf* (Bild 2).

Adresse der Verfasser: Prof. Dr. *A. Rösli, Dr. A. B. Harnik,* Institut für Baustoffe, Werkstoffchemie und Korrosion, ETH-Hönggerberg, 8093 Zürich.