

Zusammenhänge zwischen Betonporosität und Frostbeständigkeit

Autor(en): **Bitterli, Kurt / Yang, Qi-Wei / Peter, Gustav**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizer Ingenieur und Architekt**

Band (Jahr): **103 (1985)**

Heft 25

PDF erstellt am: **08.08.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-75831>

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.

Zusammenhänge zwischen Betonporosität und Frostbeständigkeit

von Kurt Bitterli, Qi-Wei Yang, und Gustav Peter, Zürich

Entscheidend für die Frost- und Frost-Tausalzbeständigkeit eines Betons ist sein Porenraum. Es wurden vier Betonsorten untersucht, die sich im Gehalt an wasserfüllbaren bzw. nichtfüllbaren Poren unterschieden. Bekannt waren die Ergebnisse der technologischen Frost- und Frost-Tausalzprüfungen. Es wurde versucht, die Vorgänge beim langsamen Gefrieren eines nicht wassergesättigten Betons und die Funktion der Luftporen modellmässig zu beschreiben. Zur Erhärtung der Theorie erfolgte einerseits die Ermittlung der Geschwindigkeit des kapillaren Wassertransports mittels einer neuen Versuchseinrichtung und andererseits die mikroskopische Bestimmung des Gehaltes und der Verteilung der nichtfüllbaren Poren.

Einleitung

Beton ist ein heterogener Baustoff, bestehend aus mineralischen Zuschlagstoffen, hydratisiertem Bindemittel, Wasser und Luft. Ein dichter Beton mit einem optimalen Wasser-Zement-Wert erweist sich als sehr beständig. Wenn man voraussetzt, dass bei der Herstellung frostbeständiges Zuschlagsmaterial sowie Portlandzement von gewohnt guter Qualität verwendet werden, so muss man annehmen, dass auftretende Frostschäden an Betonkonstruktionen auf das gefrierbare Porenwasser in der erhärteten Zementsteinstruktur zurück-

zuführen sind. Bekanntlich beträgt die Volumenzunahme beim Übergang von Wasser zu Eis rund 10% des Wasservolumens. Bei behinderter Expansion entsteht also ein hydraulischer Druck und, da die Festigkeit und Verformbarkeit des Betons nicht ausreicht, eine entsprechende Sprengwirkung.

Es wird kein oder nur ein geringer Druck aufgebaut, wenn die Poren nicht vollständig mit Wasser gefüllt waren, oder wenn eine Expansionsmöglichkeit für gefrierendes Wasser in leere Hohlräume besteht. Offensichtlich beruhen Frostschäden aber nicht nur auf der Volumenzunahme des Wassers beim Ge-

frieren. Es wurden ähnliche Frostschäden und Abplatzungen bei Flüssigkeiten beobachtet, die beim Gefrieren kontrahieren [1]. Es wird angenommen, dass in diesem Fall ein Anwachsen der Kristalle durch kapillar nachgeleitete Flüssigkeit erfolgt. Dieser Effekt kann bedeutsam werden, wenn der Gefriervorgang, d. h. der Energieentzug, relativ langsam vor sich geht und der Beton gesamthaft betrachtet nicht wassergesättigt ist. Andere Effekte müssen beim schnellen Gefrieren z. B. durch den Temperaturschock in Betracht gezogen werden [2].

Porengefüge

Das Porengefüge des Betons ist von entscheidender Bedeutung für seine Frostbeständigkeit bzw. -anfälligkeit. Der Gesamtporengehalt des Betons lässt sich einerseits in sogenannte Hydratationsporen und andererseits in Hohlräume unterteilen, die bei der Verarbeitung des Frischbetons entstanden sind oder durch spezielle Massnahmen künstlich eingeführt wurden. Eine verfeinerte Systematik des Porensystems ist aus der *Tabelle 1* ersichtlich.

Gelporen

Nach dem Mischen sind die Zementpartikel im Frischbeton vollständig von Wasser umgeben. Bei der Hydratation

Tabelle 1. Die verschiedenen Hohlraumarten im Beton und ihre Eigenschaften

Bezeichnung	Hydratationsporen		Luftporen	
	Gelporen (GP)	Kapillarporen (KP)	Verdichtungs-poren (VP)	künstl. Luftporen (LP)
– naturwissenschaftliche	füllbare Poren		nicht füllbare Poren	
– technologische				
Entstehung	bei der Hydratation des Zementes		bei der Verarbeitung des Betons	durch LP-Zusatzmittel
Wasseraufnahme	bei normaler Wasserlagerung füllbar		<ul style="list-style-type: none"> • bei normaler Wasserlagerung nicht füllbar • (füllbar bei vorgängiger Vakuum-Entlüftung oder äusserem Überdruck) 	
Bindung und Eigenschaften des Porenwassers	physik. Bindung Verdampfen > 105°C unter üblichen Bedingungen nicht gefrierbar	Kapillarkräfte Verdunsten abhängig von der Luftfeuchtigkeit gefrierbar		
Durchmesser [mm]	$2 - 4 \cdot 10^{-6}$	$10^{-5} - 10^{-3}$	10^{-2} – mehrere mm	$10^{-2} - 10^0$
naturwissenschaftliche Bestimmung		Quecksilber-Porosimetrie, REM	REM, Lichtmikroskope	
Gehalt im Beton Z = 300 kg/m ³ -Beton vollst. Hydratation [Vol.-%]	6	W/Z = 0,5 : 3,4 W/Z = 0,6 : 6,4 W/Z = 0,7 : 9,4	Normalbeton: 1–2	LP-Beton: ~ 5

entsteht allmählich eine gelartige, verfilzte und kohärente Masse, das Xerogel, und andere Hydratationsprodukte wie Kalziumhydroxid sowie Überreste von nicht hydratisiertem Zement (Bild 1). Die Hohlräume in diesem Gel, die *Gelporen*, sind $2 \cdot 10^{-6}$ bis $4 \cdot 10^{-6}$ mm gross und bei Normalbedingungen mit Gelwasser gefüllt, das physikalisch an das Gel gebunden ist und erst bei Temperaturen von mehr als 105°C aus dem Beton ausgetrieben werden kann. Es gefriert erst bei sehr tiefen Temperaturen. Man kann aber annehmen, dass das Gelwasser bei normalen Klimaverhältnissen im Winter nicht gefriert und es deshalb die Frostbeständigkeit des Betons nicht beeinflusst.

Kapillarporen

Abhängig vom W/Z-Wert und dem jeweiligen Hydratationsgrad bleibt ein bestimmter Anteil an sogenanntem «Überschusswasser» in Hohlräumen zwischen den Hydratationsprodukten zurück. Diese Hohlräume nennt man *Kapillarporen* (Bild 2). Sie sind zwischen $1 \cdot 10^{-5}$ und $1 \cdot 10^{-3}$ mm gross und besitzen im allgemeinen keine geometrisch definierbare Form. Je nach Umgebungsbedingungen (Druck, Luftfeuchtigkeit usw.) können sie ganz oder nur teilweise mit Wasser gefüllt sein. Der Gefrierpunkt des Kapillarwassers ist neben verschiedenen anderen Faktoren vor allem von der Porengrösse und der Konzentration von gelösten Salzen abhängig. Er liegt aber im allgemeinen nur wenig unter 0°C [3], so dass das Kapillarwasser bei den in der Schweiz herrschenden klimatischen Verhältnissen im Winter ohne weiteres gefrieren kann. Auch der Transport von Wasser und Wasserdampf von aussen in das Betoninnere oder umgekehrt findet hauptsächlich in den Kapillaren statt.

Verdichtungsporen

Neben den beschriebenen Gel- und Kapillarporen findet man im Beton auch sogenannte *nichtfüllbare Hohlräume* infolge ungenügender Verdichtung, «Bluten» sowie Beigabe von luftporenbildenden Zusatzmitteln. Beim Mischen des Betons bzw. beim Einfüllen in die Schalung bilden sich Lufteinschlüsse oder *Verdichtungsporen*. Durch sorgfältiges und richtiges Verdichten des Frischbetons lässt sich diese Luft normalerweise bis auf einen Restgehalt von 1 bis 2 Vol.-% austreiben. Beträgt der W/Z-Faktor mehr als 0,5, so sammelt sich oft Überschusswasser an den Korngrenzen

der Zuschlagstoffe. Man bezeichnet dieses Phänomen als «Bluten». Diese Schwachstellen an den Korngrenzen wirken sich ungünstig aus, wenn in der Zementmatrix beim Gefrieren des Kapillarwassers Druckkräfte entstehen. Nicht zuletzt aus diesem Grunde verlaufen die Bruchflächen bei Frostabplatzungen oft den Korngrenzen entlang. Der Einfluss der Verdichtungsporen auf die Frostbeständigkeit von erhärtetem Beton ist noch nicht bis ins Detail erforscht. Man darf aber annehmen, dass sie die Frostbeständigkeit erhöhen, wenn sie fein verteilt im Beton auftreten. Hingegen dürften einzelne grosse Ver-

dichtungsporen die Frost-Beständigkeit nicht beeinflussen.

Künstliche Luftporen

Ein bewährtes Mittel um die Frostbeständigkeit von Beton zu erhöhen, ist das Einführen von *künstlichen Luftporen* (Bild 3). Die am meisten angewendeten luftporenbildenden Mittel sind Tenside, deren Hauptfunktion darin besteht, die Oberflächenspannung des Anmachwassers zu reduzieren und die Blasen- oder Schaumbildung zu erleichtern. Die künstlichen Luftporen müssen aber, damit sie günstig bezüglich Frostbestän-

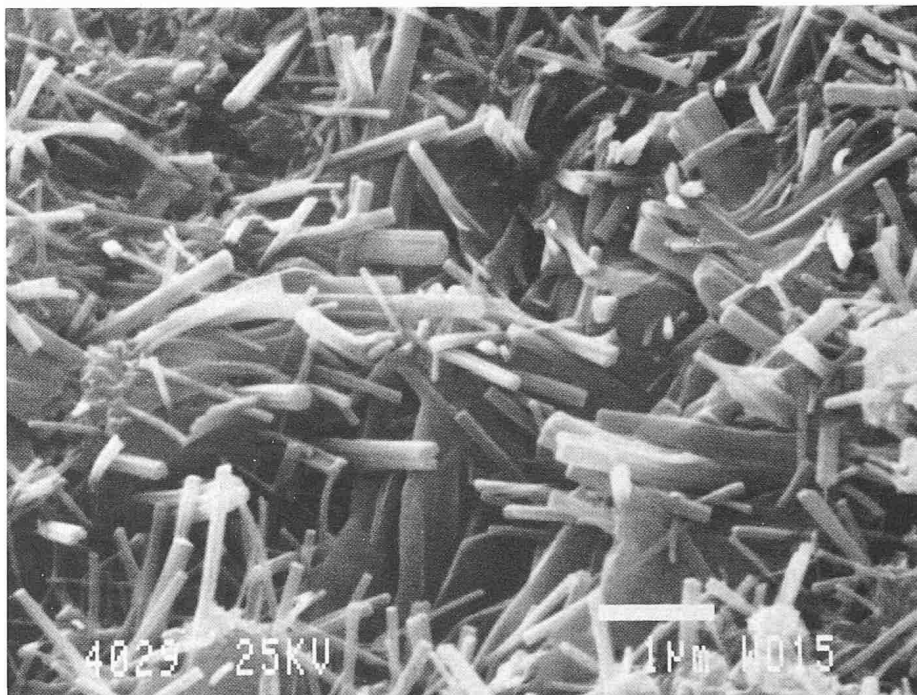
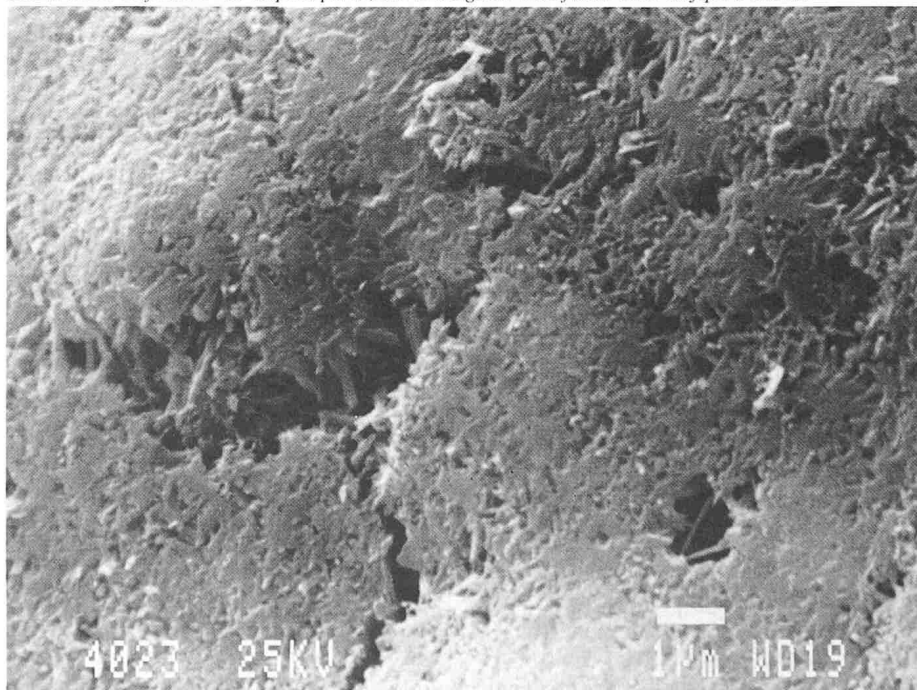


Bild 1. REM-Aufnahme von Hydratationsprodukten im Beton NB W/Z 0,68

Bild 2. REM-Aufnahme von Kapillarporen, die in die glatte Oberfläche einer Luftpore münden



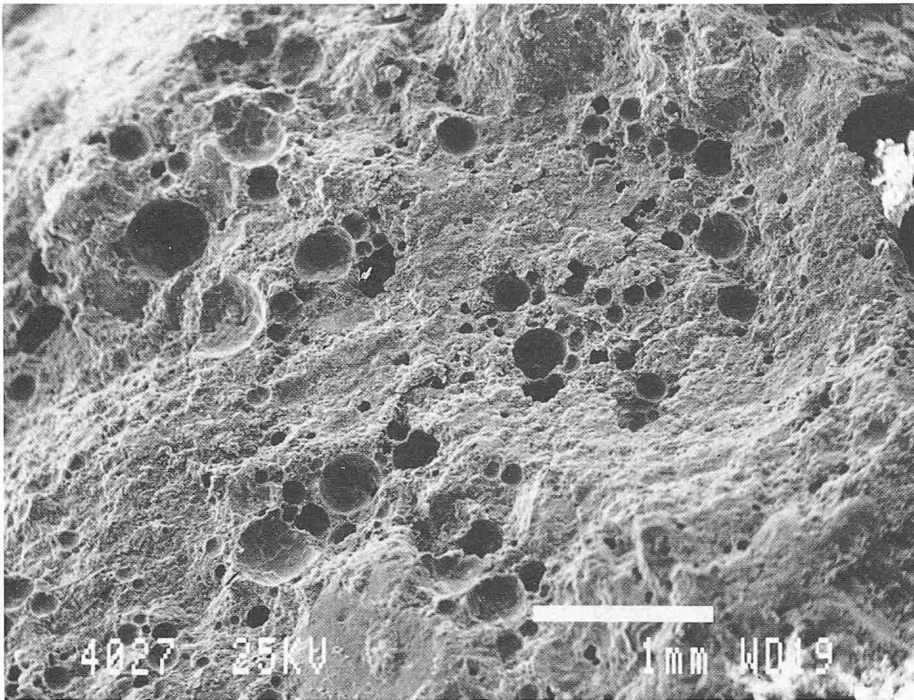


Bild 3. REM-Aufnahme von künstlichen Luftporen

digkeit wirken können, möglichst gleichmässig im Betongefüge verteilt sein. Aufgrund praktischer Erfahrung weiss man zudem, dass der Luftporengehalt zwischen 3 und 8 Vol.-% und deren Durchmesser im Mittel ungefähr 0,2 mm betragen soll.

Wasserbindung

Verschiedene Mechanismen wirken zusammen, wenn Wasser physikalisch von der Betonmatrix gebunden wird. Ein Teil des Wassers wird durch Adhäsion zwischen Wasser und der Porenoberfläche gebunden. Diese Bindung wird auch kapillare Bindung genannt. Wenn die Poren zylinderförmig wären, d. h. in der Art einer Kapillare mit einem Radius r , ergäbe sich eine Steighöhe in der Kapillare von

$$(1) \quad h = 2\sigma r^{-1} g^{-1} \cdot \rho^{-1} \cdot \cos \varphi$$

- h Steighöhe
- σ Oberflächenspannung
- r Innenradius der Kapillare
- g Fallbeschleunigung
- ρ Dichte des Wassers
- φ Benetzungswinkel

Setzt man Zahlenwerte für Wasser bei 20°C ($\sigma = 72,9 \text{ dyn/cm}$) ein, so ergibt sich für $\varphi = 0$ (gut benetzbar)

$$(2) \quad h = 0,15 r^{-1} [\text{cm}] \quad [\text{cm}]$$

Bei abnehmendem Radius r wächst die Steighöhe. Das Wasser bedeckt je nach

dem Wassergehalt des Betons die Matrix mit einem mehr oder weniger dicken Film. Bei geringen Wassergehalten kann dieser Film auch unterbrochen sein.

Der Saugdruck der Matrix, der *Matrixdruck* S_m , soll durch das folgende Gedankenexperiment mit einem sog. Tensiometer veranschaulicht werden (Bild 4). Die poröse Zelle erlaubt dem Wasser und den Salzlösungen den Durchgang. Das Tensiometer im ungesättigten Beton zeigt einen Druckunterschied zu einem Tensiometer im Wasser von S_m . Dieser positiv genommene Wert ist der Matrix(saug)druck S_m . Mit abnehmender Menge Wasser W_v , die in der Volumeneinheit Beton verbleibt, wird der Matrixdruck zunehmen.

Bisher wurde vernachlässigt, dass das Porenwasser in Wirklichkeit eine Salzlösung ist. Die Lösung wird umso konzentrierter, je mehr Wasser weggeht, d. h. verdunstet oder gefriert. Zwischen einer Lösung und reinem Wasser kann man einen Druckunterschied, den osmotischen Druck, messen. Dieser resultiert aus dem Bestreben, Konzentrationsunterschiede auszugleichen. Mit abnehmender Wassermenge im Beton wirken dadurch Saugkräfte in der gleichen Richtung wie beim Matrixdruck.

Potentiale

Durch die von der Matrix und der Porenlösung auf das Wasser wirkenden

Kräfte bilden sich Potentiale aus. Mit dem Potential φ in einem bestimmten Punkt wird die Arbeit verstanden, die aufgewendet werden muss, um eine Masseinheit von einem Referenzpunkt zu diesem Punkt zu verschieben. Da die Lage des Referenzpunktes meist nicht bekannt ist, spricht man von den Unterschieden zwischen zwei Potentialen, dem Potentialgradienten.

Die Potentiale φ können als Energie pro Masseinheit angegeben werden oder als φ' , d. h. als Energie pro Volumeneinheit, was der Dimension des Druckes entspricht:

$$(3) \quad \varphi' = \rho \cdot \varphi \quad (\rho \text{ Dichte des Wassers})$$

Es müssen folgende Teilpotentiale beachtet werden:

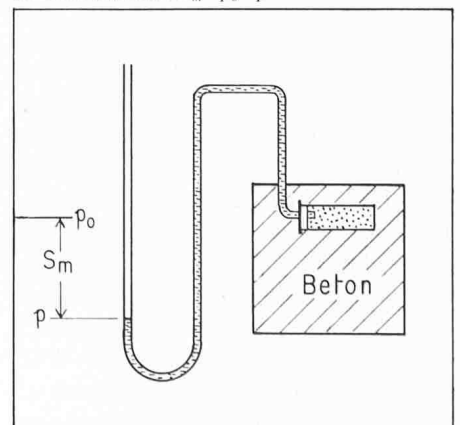
- das Matrixpotential φ_m ,
- das osmotische Potential φ_o ,
- Schwerkraftpotential φ_g ,
- das Druckpotential φ_p .

$$(4) \quad \begin{aligned} \varphi_m &= -S_m \rho^{-1} \\ \varphi_o &= -\pi \cdot \rho^{-1} \\ \varphi_g &= g \cdot h \\ \varphi_p &= g \cdot h_p \end{aligned}$$

- S Matrixdruck
- ρ Dichte des Wassers
- π osmotischer Druck
- g Fallbeschleunigung
- h Höhe der Wassersäule
- h_p Höhe der überlagernden Wassersäule

Das Matrix- und das osmotische Potential und die entsprechenden Drücke haben verschiedene Vorzeichen, da die Arbeit gegen diese Kräfte verrichtet wird.

Bild 4. Gedankenexperiment zur Veranschaulichung des Matrixdruckes $S_m = p_o - p$



Wasserbewegung im Beton

Jede Änderung des hydraulischen Potentials φ_H bewirkt eine Wasserbewegung. Bei der freien Bewegung der im Wasser gelösten Stoffe kann das osmotische Potential φ_o unberücksichtigt bleiben. Es gilt im gesättigten Bereich:

$$(5) \quad \varphi_H = \varphi_g + \varphi_p$$

bzw. im ungesättigten Bereich z. B. bei einem Aufsaugversuch an einer trockenen Betonprobe:

$$(6) \quad \varphi_H = \varphi_g + \varphi_m$$

Die Fließbewegung ist eine Folge von Potentialgradienten (Bild 5). Für die Wasserbewegung im ungesättigten Zustand gilt:

$$(7) \quad v = k'(W_v) \frac{d\varphi'_H}{dx}$$

- v Fließgeschwindigkeit
- $k'(W_v)$ Leitfähigkeit in Abhängigkeit von Wassergehalt
- $\frac{d\varphi'_H}{dx}$ hydraulischer Potentialgradient
- x Weg

Daraus ergibt sich als Näherung, dass die Steighöhe bei einem Aufsaugversuch proportional zur Wurzel aus der Zeit ist:

$$(8) \quad h = k(W_v) \cdot \sqrt{t}$$

- t Zeit
- h Steighöhe
- $k(W_v)$ Koeffizient der kapillaren Wasserleitung

Das Gefrieren von Wasser in Beton

Wie erwähnt, befindet sich das gefrierbare, relativ leicht bewegliche Wasser in den Kapillarporen des Zementsteins. Die Kapillaren sind im allgemeinen nicht röhrenförmig, sondern bilden ein

beliebig geformtes Hohlraumsystem mit einer riesigen Oberfläche von etwa $2 \cdot 10^6 \text{ cm}^2/\text{g}$. Die erwähnten physikalischen Zusammenhänge müssten folglich für exakte quantitative Betrachtungen entsprechend modifiziert werden; sie sind hingegen ohne weiteres geeignet, um gewisse Kapillar-Phänomene im Beton mindestens qualitativ zu beschreiben.

Ist z. B. der Wassersättigungsgrad eines Betons kleiner als 100%, so bildet das vorhandene Kapillarwasser einen mehr oder weniger dicken Film auf der riesigen Innenfläche der Zementmatrix. In einem langsam von aussen her gefrierenden Beton vermindert sich der Wassergehalt, indem die wässrige Porenlösung in die feste (Eis-)Phase übergeht. Der Effekt der Eisbildung ist also mit einem Wasserentzug bzw. mit einer «Austrocknung» der Probe vergleichbar und führt dazu, dass das Matrixpotential steigt. Gleichzeitig steigt in diesem Frostbereich die Konzentration der in der Restlösung verbleibenden Salze und somit auch das osmotische Potential. Die Potentialänderungen bewirken, dass Wasser nachströmt und dann ebenfalls gefriert. Die entstehenden Eiskristalle können dadurch so stark wachsen, dass bei behinderter Expansion ein Kristallisationsdruck entsteht. Dieser kann um einiges grösser sein als die lokale Zementsteinzugfestigkeit bzw. die Haftfestigkeit an den betreffenden Korngrenzen. Frostschäden in Form von Betonabplatzungen sind dann unvermeidbar (Bild 6). Nach dieser Vorstellung ist die Schadenbildung auch von der sogenannten ungesättigten kapillaren Leitfähigkeit $k(W_v)$ der Gefrierfront abhängig. Die beste Wassernachleitung in ungesättigtem Zustand dürften Betone mit einem grossen Anteil an Kapillarporen aufweisen.

Der Einfluss künstlicher Lufporen und kleiner Verdichtungsporen im Kapillar-

system bezüglich der kapillaren Wasserleitfähigkeit ist noch nicht eindeutig geklärt. Es ist aber anzunehmen und theoretisch durchaus erklärbar, dass diese Hohlräume die Geschwindigkeit des kapillaren Wassertransportes im ungesättigten Zementstein vermindern. Damit hätten sie eine doppelte Funktion: einerseits bilden sie Expansionsraum für gefrierendes Wasser und andererseits behindern sie das Nachströmen von gefrierbarem Wasser (Bild 7).

Das Bild 8 erhärtet die Modellvorstellung für die Funktion der Luftporen als Expansionsraum: es zeigt Hydratationsprodukte, die bei Raumtemperatur in eine Luftpore hingewachsen sind.

Beurteilung der Betonporosität

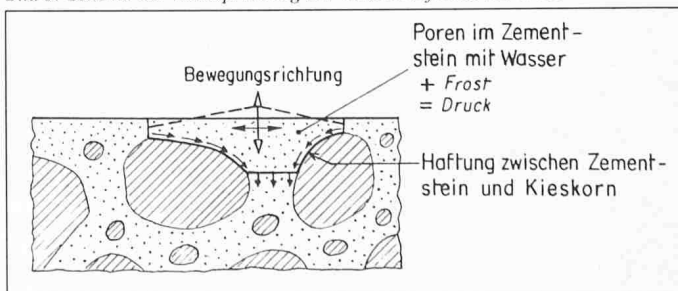
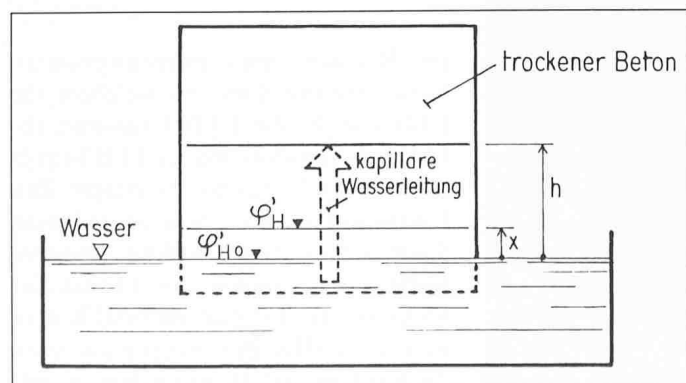
Für die experimentelle Bestimmung der Betonporosität eignen sich verschiedene Untersuchungen, die Kriterien für die Beurteilung der Frost- bzw. Frosttausalz-Resistenz ergeben.

Mit *technologischen Untersuchungen* können die verschiedenen Porenarten auf einfache Art bestimmt werden [4]. Prinzipiell werden dazu die Betonproben nach Aufsaugversuchen und Vakuum sättigung sowie nach verschiedenen Austrocknungsphasen bei genau definierten Bedingungen gewogen. Aus der Gewichts-differenz kann dann über die Dichte ohne Schwierigkeiten das Porenvolumen bzw. der Hohlraumgehalt berechnet werden.

Es hat sich gezeigt, dass es für jeden Beton einen bestimmten *kritischen Sättigungsgrad* s_{Kr} gibt. Liegt der im Beton vorhandene Wassergehalt über s_{Kr} , so können schon wenige Frostwechsel zu Schäden führen. Andererseits ist ein Beton dann frostbeständig, wenn die Differenz (Δs) zwischen s_{Kr} und dem

Bild 5 (links). Potentialgradient beim Aufsaugversuch

Bild 6. Schema der Beanspruchung der Betonoberfläche bei Frost



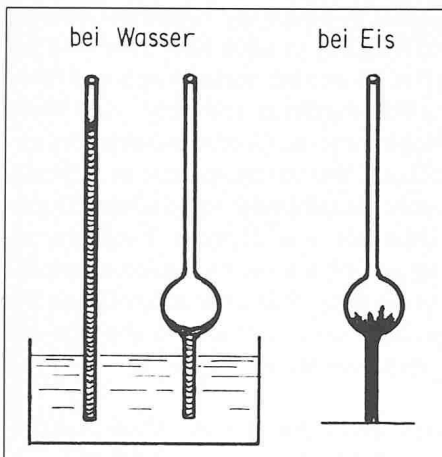


Bild 7. Modellvorstellung für die Funktion der Luftporen: Behinderung der kapillaren Wasserleitung und Wirkung als Expansionsgefäß beim Gefrieren

durch kapillares Aufsaugen maximal erreichbaren Sättigungsgrad s_E gross ist:

$$(9) \quad \Delta s = s_{Kr} - s_E > 0$$

Die Erfahrung zeigt zudem, dass durch Einführen von künstlichen Luftporen s_E stärker abnimmt als s_{Kr} . Diese erhöhen also die Frostbeständigkeit wesentlich.

Der Nachweis der *Frosttausalz-Beständigkeit (FT)* kann z. B. mit der sogenannten EMPA-Methode erfolgen, indem auf eine kapillar gesättigte Probe eine 3%ige NaCl-Lösung aufgebracht wird. Die Proben werden anschliessend 30 Frost-Auftau-Zyklen ($-12^\circ\text{C}/+18^\circ\text{C}$) ausgesetzt. Die abgelöste Betonmenge von repräsentativen Oberflächen ist das Mass für die Beurteilung der FT-Resistenz.

Bestimmungen der Frost-Beständigkeit mit der Methode des kritischen Sätti-

gungsgrades bzw. der Frostausalz-Beständigkeit nach der EMPA-Methode benötigen etwa vier Wochen Zeit. Die Resultate sind aber sehr aussagekräftig, da beide Methoden versuchen, die Einflussgrössen und die Randbedingungen wirklichkeitsnah zu simulieren.

Der Gehalt an nichtfüllbaren Poren (Verdichtungsporen und Luftporen) kann auch mit Hilfe von *mikroskopischen Untersuchungen* und den theoretischen Grundlagen der quantitativen Stereologie bestimmt werden. Die Luftporenanschnitte in einem repräsentativen Betonanschnitt werden dabei ausgezählt und vermessen. Durch Wahrscheinlichkeitstheoretische Überlegungen lassen sich beim Luftporenbeton daraus räumliche Porenkennwerte wie Luftporengehalt, numerische Dichte und die Verteilung der Luftporendurchmesser berechnen. Bei den in diesem Bericht als Verdichtungsporen bezeichneten Hohlräumen muss man sich im allgemeinen wegen ihrer unterschiedlichen Form darauf beschränken, nur den Hohlraumgehalt in Volumen-% anzugeben. Der Gehalt an künstlichen Luftporen sowie Verdichtungsporen wurde nach *Delesse* [5] bestimmt. Es wird dabei vorausgesetzt, dass das experimentell bestimmte Verhältnis von angeschnittenen Luftporen zur Feststofffläche gleich gross ist wie der Luftgehalt bezüglich Betonvolumen. Der Gehalt an nichtfüllbaren Poren ist oft vom Abstand von der Oberfläche abhängig (Bild 9).

Für die Beurteilung der FT-Beständigkeit benützt man oft den sogenannten *Abstandsfaktor*, welcher sich aus dem LP-Gehalt und aus dem mittleren Luftporendurchmesser unter Verwendung eines einfachen Modells bestimmen lässt. Er gibt die grösste Entfernung eines beliebigen Punktes im Zementstein vom Rand der nächsten Luftpore an (Bild 10). Er ist somit die grösste Distanz, die Wasser in einer Kapillare bis zum Rand der nächsten Luftpore bei Expansion infolge Eisbildung zurücklegen muss. Je kürzer dieser Weg ist, desto besser ist die Frost- bzw. Frostausalzbeständigkeit des Betons.

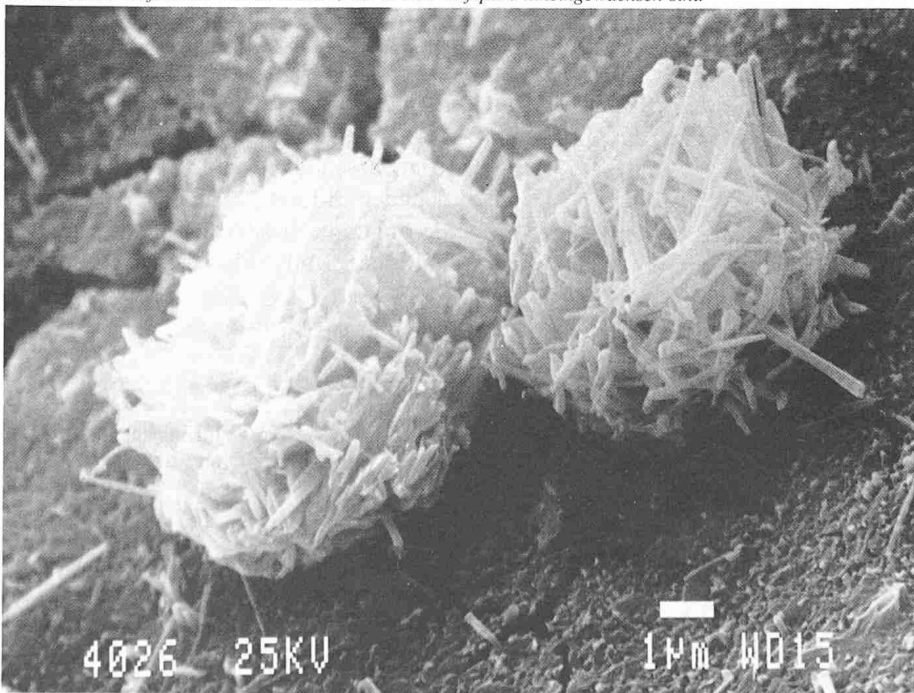
Das Auszählen der in der Regel kugelförmigen Luftporen und der meist nicht kugelförmigen Verdichtungsporen erfolgte für diese Arbeit halbautomatisch an Anschliffen ohne Präparation. Mikroskopische Untersuchungen können auch ohne grossen präparativen Aufwand durchgeführt werden und liefern innert kurzer Zeit brauchbare Resultate. Wenn eine Vergleichsmöglichkeit mit technologischen Untersuchungsergebnissen besteht, kann die Mikroskopie und insbesondere die Luftporenbestimmung also ohne weiteres für die Überwachung während des Bauens eingesetzt werden.

Zur Ermittlung der Geschwindigkeit des kapillaren Wassertransportes im ungesättigten, trockenen Zustand wurde anhand von *Aufsaugversuchen* die Verweilzeitfunktion des Wassers an drei Mess-Stellen bestimmt (Bild 11). Diese Verweilzeiten konnten in dieser Arbeit mit Hilfe von elektrischen Leitfähigkeitsmessungen bestimmt werden. Aus den mittleren Verweilzeiten des Wassers an den drei Mess-Stellen wurde ein Koeffizient der kapillaren Wasserleitung k [$\text{mm}/\text{h}^{1/2}$] ermittelt.

Versuche an vier verschiedenen Betonsorten

Im Rahmen eines interuniversitären Forschungsprojektes, an welchem die ETH Zürich, die ETH Lausanne, die EMPA Dübendorf und die TFB Vernier beteiligt sind, laufen seit einiger Zeit Untersuchungen, die sich im weitesten Sinne mit der Betonstruktur befassen. Insbesondere werden am Institut für Baustoffe, Werkstoffchemie und Korrosion der ETHZ Beziehungen zwischen der Struktur und der Frost- bzw. Frost-

Bild 8. REM-Aufnahme von Kristallen, die in eine Luftpore hineingewachsen sind



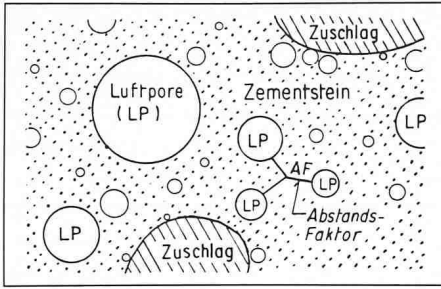


Bild 10. Schematische Erläuterung des Abstands-faktors

Tausalz-Beständigkeit von Beton sowohl theoretisch als auch experimentell abgeleitet.

Für die Untersuchungen, die den vorliegenden Bericht betreffen, wurden Experimente an vier verschiedenen Betonsorten durchgeführt.

Einerseits wurde ein Beton niedriger Qualität hergestellt, der erfahrungsgemäss eine schlechte Frost-Tausalz-Beständigkeit aufweist. Dieser Beton hat einen relativ hohen W/Z-Wert und ist zudem schlecht verdichtet. Er wird im folgenden mit NB ($W/Z = 0,68$) bezeichnet. Man hat versucht, diesen Beton wieder frostbeständig zu machen, indem künstliche Luftporen eingeführt und die Verdichtungszeit erhöht wurden. Auf diese Weise entstand der Luftporenbeton LP ($W/Z = 0,68$; normal vibriert). Um den Einfluss der Verarbeitung, d. h. insbesondere der Verdichtung festhalten zu können, wurde zudem ein übervibriertes Luftporenbeton hergestellt: LP ($W/Z = 0,68$; übervibriert). Schliesslich stand für Vergleichszwecke ein sogenannter «EMPA-Standard»-Beton mit einem W/Z-Wert von 0,5 zur Verfügung: NB ($W/Z = 0,5$).

Mit den vier Betonsorten wurden Stellwände (1000 mm x 1000 mm x 200 mm) jeweils schichtweise betoniert und mit einem Nadelvibrator verdichtet. Ausge-

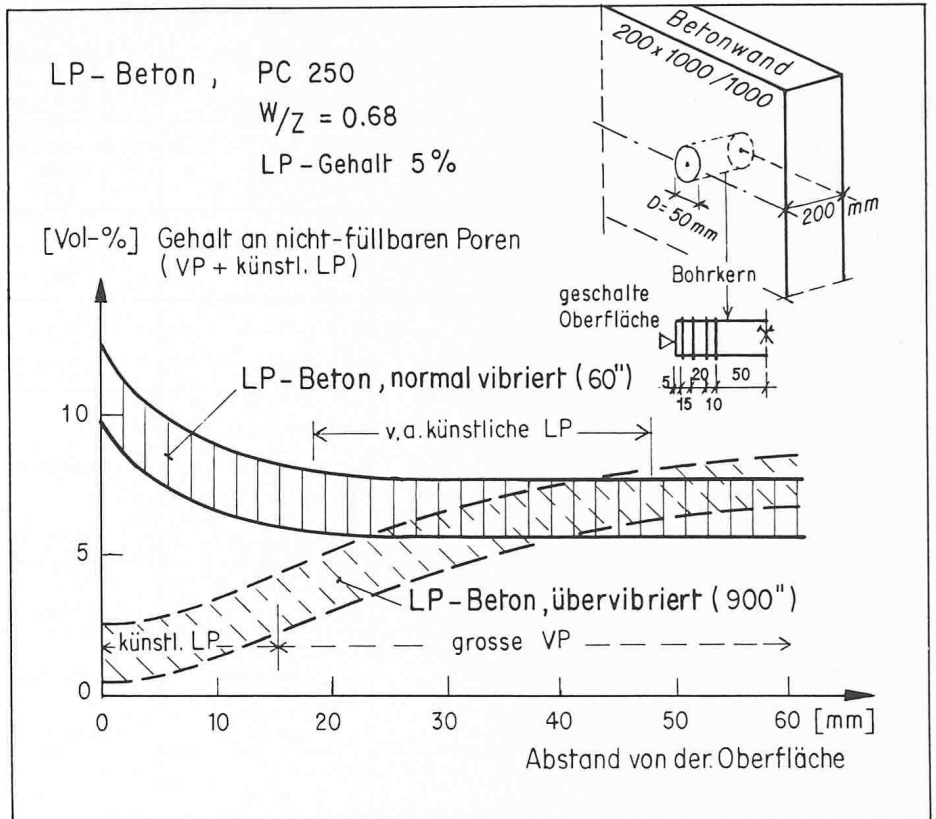


Bild 9. Gehalt an nichtfüllbaren Poren in Funktion des Oberflächenabstandes bei Luftporenbeton normal und übervibriert

schaft wurde nach zwei Tagen. Die anschliessende Lagerung erfolgte bei einer Temperatur von 20°C und einer relativen Luftfeuchtigkeit von 90%.

Für die technologischen Versuche wurden Bohrkern entnommen. Die stereologische Untersuchung erfolgte an Anschliff-Flächen von Prismen von 100 mm x 60 mm, wobei jeweils 12 Streifen mit 45 Messfenstern mit unterschiedlichen Abständen von der Schalungsfläche mikroskopisch analysiert wurden (Bild 12). Für die Aufsaugversuche mit elektrischer Leitfähigkeitsmessung wurden Probekörper in Form von Scheiben (200 mm x 200 mm x 35 mm) aus den Wänden geschnitten. Die Elektroden für die Leitfähigkeitsmessungen

wurden in verschiedenen Höhen an drei Stellen in Form eines Kupferlackes appliziert.

Schliesslich mussten für die Überprüfung der Frost-Tausalz-Beständigkeit Betonplatten mit den Abmessungen 200 mm x 200 mm x 50 mm hergestellt werden. Das Betonalter bei den Untersuchungen betrug etwa 8 Monate.

Resultate und Interpretationen

In der Tabelle 2 sind die verschiedenen Versuchsergebnisse zusammenfassend dargestellt, und anhand der Resultate wurde versucht, aufgrund der heute

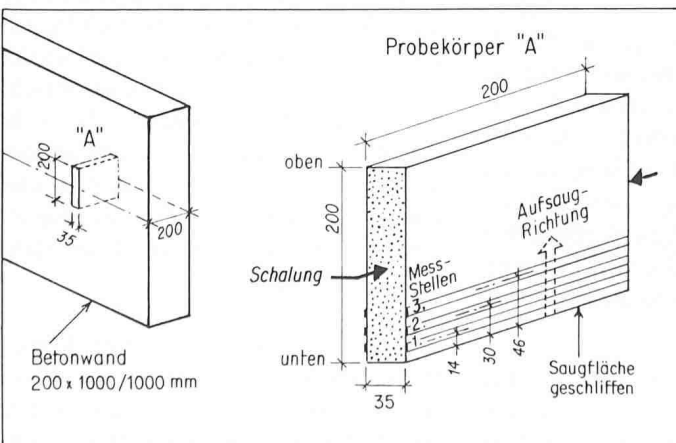
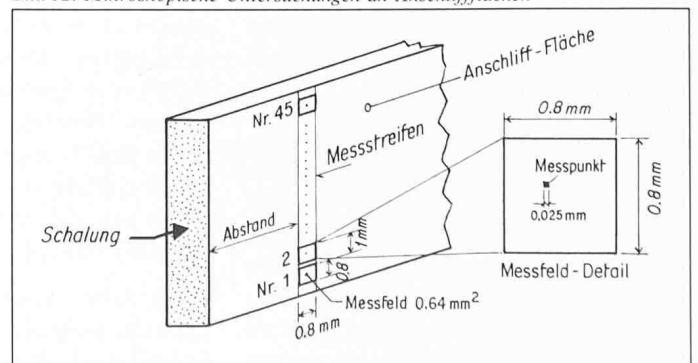


Bild 11 (links). Probekörper für Aufsaugversuche

Bild 12. Mikroskopische Untersuchungen an Anschliffflächen



	NB (W/Z = 0,5) PC 300 kg/m ³	NB (W/Z = 0,68) PC 250 kg/m ³	LP (W/Z = 0,68, normal vibriert) PC 250 kg/m ³	LP (W/Z = 0,68, übevibriert) PC 250 kg/m ³
<i>Frischbetonkontrolle</i> Verdichtungsmaß Luftporengehalt [Vol.-%] (Lufttopf)	1,30 2,10	1,09 1,60	1,08 5,00	1,08 5,00
<i>Festigkeitswerte bei der F-FT-Prüfung</i> (Betonalter 210 Tage) Würfeldruckfestigkeit [N/mm ²]	53,2	37,1	23,7	32,1
<i>Kapillarporengehalt</i> Aus Aufsaugversuch (EMPA) [Vol.-%] aussen/innen	9,01/5,71	10,34/7,51	11,38/9,37	12,00/9,60
<i>Nicht füllbare Poren</i> <i>Technologisch</i> (EMPA) [Vol.-%] aussen/innen	1,65/1,85	1,40/1,67	5,89/6,04	1,25/1,69*
<i>Mikroskopisch</i> [Vol.-%] aussen/innen (ausen bis 15 mm Tiefe)	2,35/2,27	4,23/2,15	8,54/7,82	2,27/5,48*
<i>Koeffizient der kapillaren Wasserleitung**</i> [mm/h ^{1/2}] bis 50 mm	4,08	11,90	5,60	16,30
<i>Frostbeständigkeit</i> ΔS (EMPA) aussen/innen daraus F-Beständigkeit ausen/innen	0,040/0,060 mittel/hoch	0,026/0,045 mittel/mittel	0,144/0,167 hoch/hoch	0,008/0,027 tief/mittel
<i>Massgebender Abstandsfaktor</i> a) <i>Nur Luftporen</i> [mm] daraus F-Beständigkeit (hoch wenn AF ≤ 0,2 mm) b) <i>Luft- und Verdichtungs-poren</i> (angenommen Kugeldurchmesser 0,2 mm) [mm] aussen/innen daraus F-Beständigkeit (hoch wenn AF ≤ 0,2mm) ausen/innen	0,248 0,214/0,218	0,321 0,166/0,225	0,083 hoch hoch/hoch	0,156 mittel/hoch
<i>Mikroskopische Beurteilung</i> ausen/innen	sehr dicht/ viele kleine VP, dicht	locker/locker, viele grosse VP	sehr dicht nur LP/ dicht, einige grosse VP	dicht/sehr locker, inhomogen
<i>Frosttausalzbeständigkeit</i> a) EMPA b) aus Abstandsfaktor (hoch, wenn AF ≤ 0,15)	hoch	mittel bis tief	mittel bis hoch hoch/hoch	mittel

Tabelle 2. Versuchsergebnisse

* Beton ist stark inhomogen

** Beton bei 50°C getrocknet

gängigen Normen und Richtlinien die Frost- sowie die Frost-Tausalz-Beständigkeit zu beurteilen.

Betrachtet man den Gehalt an nichtfüllbaren Poren, so fällt auf, dass die mit technologischen Bestimmungsverfahren ermittelten Hohlraumgehalte stets tiefer sind als jene aus den mikroskopischen Untersuchungen. Die frappanten Unterschiede beim übevibrierten Luftporenbeton sind auf Inhomogenitäten in seiner Struktur zurückzuführen.

Diese Experimente ergaben eine eindeutige Korrelation zwischen dem Kapillarporengehalt und dem Koeffizienten der kapillaren Wasserleitung (Bild 13), je grösser der Kapillarraum in einem Beton ohne künstliche Luftporen ist, umso schneller erfolgt der kapillare Wassertransport. Es liess sich zudem

zeigen, dass in diesen Versuchen die Luftporen die Geschwindigkeit des kapillaren Wassertransportes vermindern.

Beim normal vibrierten Beton mit einem Kapillarporengehalt von etwa 9,5 Vol.-% und einem Gehalt an nichtfüllbaren Poren zwischen 6 bis 8 Vol.-% wurde ein rund halb so grosser Koeffizient der kapillaren Wasserleitung gemessen als beim Normalbeton mit vergleichbarem Porengehalt (Bild 14). Damit korreliert der Koeffizient der kapillaren Wasserleitung auch mit der durch den Sättigungsindex ermittelten Frostbeständigkeit, jedoch nicht unbedingt mit der technologischen Frost-Tausalz-Prüfung.

Diese Arbeit zeigt auch, dass es ohne weiteres möglich ist, die Frost- und Frost-Tausalz-Beständigkeit von Luft-

porenbeton mit Hilfe von mikroskopischen Untersuchungen rasch und zuverlässig zu bestimmen. Dies ist insbesondere für die Praxis von Interesse, da solcher Beton mit künstlichen Luftporen zunehmend immer dann eingesetzt wird, wenn mit einer intensiven Frost-Tausalz-Beanspruchung zu rechnen ist. Zudem ist es beim Bauen immer wieder erwünscht, die angeordneten betontechnologischen Massnahmen, d. h. z. B. die Wirkung eines luftporenbildenden Zusatzmittels sofort zu überprüfen und laufend anzupassen. Dafür sind Resultate von stereologischen Analyseverfahren prädestiniert.

Hingegen erweist es sich als problematisch, wenn die Frostbeständigkeit eines Betons ohne künstliche Luftporen nur mittels mikroskopischer Untersuchungen

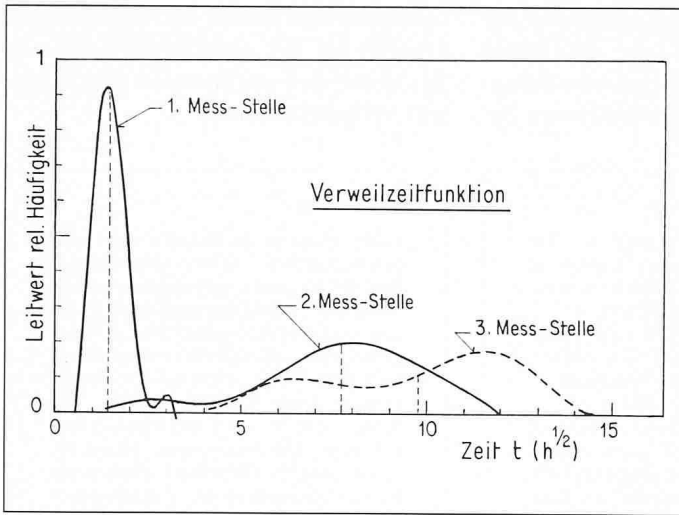


Bild 13. Bestimmung des Koeffizienten der kapillaren Wasserleitung aus den drei Mess-Stellen (Normalbeton bei 50°C getrocknet)

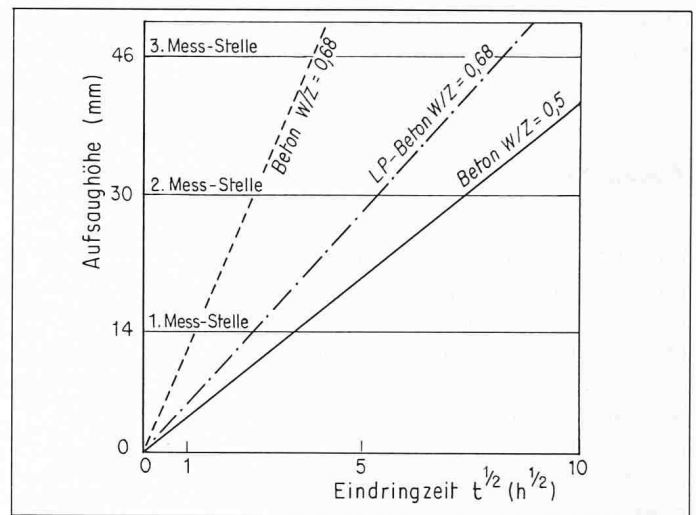


Bild 14. Kapillare Wasserleitung von drei bei 50°C getrockneten Betonsorten, ermittelt durch elektrische Leitfähigkeitsdetektion

gen bzw. den daraus berechenbaren Abstands-faktoren überprüft wird. Denn einerseits besitzt er einen geringen Gehalt an nichtfüllbaren Poren und andererseits ist die Luft in einzelnen, relativ grossen Verdichtungs-poren verteilt. Berechnet man daraus die Abstands-faktoren AF z. B. mit der Beziehung [6]

$$(10) \quad AF = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \sqrt[3]{\frac{36 \pi (V_{VZ} + V_{VW} + V_{VLP})}{V_{VLP} \cdot O^3}} - \frac{3}{O}$$

V_{VZ} Zementsteingehalt in Vol.-% bezogen auf das Betonvolumen

V_{VW} Wassergehalt in Vol.-% bezogen auf das Betonvolumen

V_{VLP} Luftporengehalt in Vol.-% bezogen auf das Betonvolumen

O spezifische Oberfläche (1/m)

so fallen die entsprechenden Werte verständlicherweise gross aus. Ein grosser Abstands-faktor bedeutet aber, dass ge-

frierendes Kapillarwasser infolge der grossen Distanz bis zur nächsten Luft-bzw. Verdichtungs-pore nur schlecht expandieren könnte. Würde ein solcher Beton einzig nur aufgrund des Kriteriums «Abstands-faktor» beurteilt, so müsste er logischerweise als nicht frost-beständig bezeichnet werden. Dieses Resultat widerspricht aber den praktischen Erfahrungen, denn es zeigt sich immer wieder, dass ein einwandfrei her-gestellter Normalbeton mit einem W/Z-Faktor von 0,5 (oder weniger) gegen Frosteinwirkung resistent sein kann.

Die Frost-Tausalzeinwirkung muss deutlich von der Frosteinwirkung unterschieden werden. Sie bewirkt in der Regel grössere Schäden. Beim Austrocknen eines mit Kochsalzlösung getränkten Betons kann ein zusätzlicher Druck durch das Wachstum von Salzkristallen erzeugt werden. Nach Tausalzeinwirkungen konnten bisher im Beton nie typische, kubische Kochsalzkristalle gefunden werden. Dagegen

zeigten REM-Aufnahmen neue kristall-artige Gebilde. Es ist bekannt [7], dass Chloridionen stengliges Kalziumsilikat-hydrat in eine netzartige Struktur transformieren können (Bild 15). Es besteht weiter die Möglichkeit, dass durch einen Ionenaustausch ein Natrium-Kalzium-Silikat-Gel entsteht. Dieses könnte die

Bild 15. REM-Aufnahme netzartiger Strukturen im Zementstein nach der Einwirkung von NaCl auf NB W/Z = 0,68

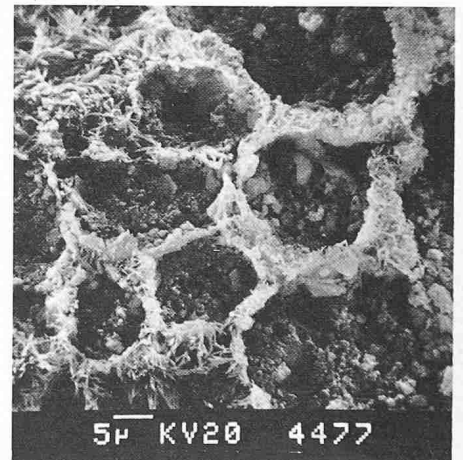
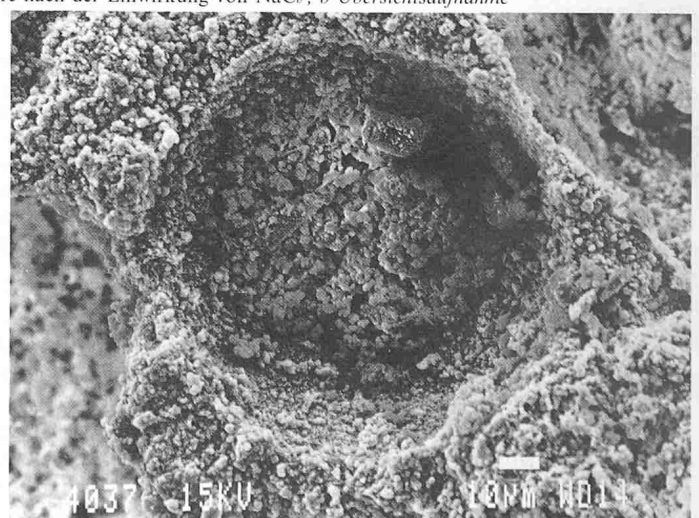
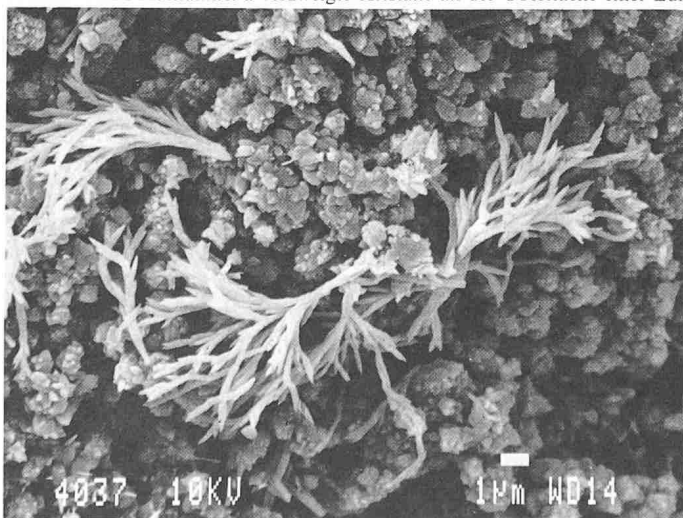


Bild 16. REM-Aufnahme. a verzweigte Kristalle an der Oberfläche einer Luftpore nach der Einwirkung von NaCl; b Übersichtsaufnahme



Ursache für die Ausbildung der im Bild 16 beobachteten neuen kristallähnlichen Formen im Zementstein sein.

Zusammenfassung

Ein dichter Beton mit einem geringen wasserfüllbaren Kapillarporenraum erweist sich im allgemeinen als beständig. Da dies in der Praxis nicht leicht zu realisieren ist, werden im Beton zur Verbesserung seiner Frost- und Frost-Tausalzbeständigkeit künstliche Luftporen eingeführt. Diese wirken als Expansionsraum beim Gefrieren des Wassers. Gleichzeitig vermindern sie die Geschwindigkeit des kapillaren Wassertransports und beschleunigen das Austrocknen des Betons. Wichtig ist die gleichmässige Verteilung der Luftporen, insbesondere auch an der am stärksten gefährdeten Betonoberfläche. Für eine Qualitätsüberwachung eignet sich u. a. die Lichtmikroskopie. Bei der Einwirkung von Tausalzen können auch Matrixänderungen auftreten, deren Auswirkungen aber noch zu wenig bekannt

sind. Mit den heutigen Kenntnissen der Schadenmechanismen, der Beachtung der erforderlichen konstruktiven Massnahmen, den Mitteln der modernen Be-

tontechnologie sowie der notwendigen Sorgfalt bei der Ausführung kann ein Beton mit der gewünschten Beständigkeit hergestellt werden.

Literatur

- [1] *Beaudoin, J. J., MacInnis, C.*: The Mechanism of Frost Damage in Hardened Cement Paste. *Cement Concrete Res.* 4 (1974), 139
- [2] *Rösli, A., Harnik, A. B.*: Zur Frost-Tausalz-Beständigkeit von Beton, *Schweiz. Ingenieur und Architekt*, 97 (1979), H. 46 S. 929–934
- [3] *Rösli, A.* und Mitarbeiter: Frost- und Tausalzbeständigkeit von Beton, *Schlussbericht Forschungsprojekt 9/78*, Strassenbauforschung des Eidg. Departements des Innern
- [4] *Studer, W.*: Die Bestimmung der Frostbeständigkeit von Beton, *Schweiz. Bauwirtschaft* 79 (1980), 20
- [5] *Underwood, E. E.*: Quantitative Stereologie, Addison-Wesley Publishing Comp., Reading (1979)
- [6] *Bitterli, K.*: Stereologische Gefügeuntersuchungen an Beton zur Beurteilung dessen Frostbeständigkeit, *Bericht des Instituts für Baustoffe, Werkstoffchemie und Korrosion, ETH Zürich*, (1983)
- [7] *Regourd, M.*: Durabilité des Bétons. *Conseil International de la Langue Française*, Paris (1983)

Verdankung

Diese Arbeit ist im Rahmen eines vom Schweizerischen Schulratspräsidenten, Prof. *M. Cosandey*, geförderten interuniversitären Forschungsprojektes «Gefüge und mechanische Eigenschaften zementgebundener Werkstoffe» entstanden. Herr Prof. Dr. *A. Rösli* hat die Durchführung dieser Arbeit ermöglicht. Wir danken ihm für die Unterstützung und die wertvollen Anregungen. Herrn *W. Studer*, EMPA Dübendorf, danken wir für die Überlassung der Versuchsergebnisse der technologischen Prüfungen. Die Durchführung der REM-Aufnahmen ermöglichte Herr *P. Wägli*, Laboratorium für Festkörperphysik, ETH-Hönggerberg.

Adresse der Verfasser: *K. Bitterli*, dipl. Bauing. ETH, *Q. Yang*, dipl. Baustoffing., Tong-Ji-Universität Shanghai, z. Zt. in der Schweiz, Dr. sc. nat. *G. Peter*, dipl. Natw. ETH, Institut für Baustoffe, Werkstoffchemie und Korrosion, ETH-Hönggerberg, 8093 Zürich

Zur Carbonatisierung von Beton

Von Emil Koelliker, Wildegg

Bedingt durch verschiedene Schadenfälle ist man sich allgemein bewusst geworden, dass die Carbonatisierung ein Faktor ist, der die Dauerhaftigkeit des Stahlbetons bestimmen kann. In einem ersten Teil werden in grundsätzlichen Erwägungen die Einflüsse der Carbonatisierung auf den Beton und die für die Carbonatisierung günstigen und ungünstigen Bedingungen dargelegt. Es wird gezeigt, dass die Ursache für die Zerstörung des Betons nicht die Carbonatisierung, sondern die Korrosion des Stahles ist.

Im zweiten Teil werden die praktischen Aspekte der Erfassung der Carbonatisierung, des Einflusses der Witterung, der Betonqualität besprochen und gezeigt, wie man das Eintreten von Schäden vorausbestimmen kann. Die Methoden zum Schutz gegen die Wirkung der Carbonatisierung werden kurz diskutiert.

Abschliessend wird die zu erwartende Dauerhaftigkeit von unbewehrtem Beton als sehr gut beurteilt. Bei bewehrtem Beton kann durch die Überwachung das Fortschreiten der Carbonatisierung ermittelt und gegebenenfalls der Zeitpunkt des Eintretens von Stahlkorrosionsschäden hinausgezögert werden. Bei einwandfreier Konstruktion können Betonbauwerke auf jeden Fall viele Jahrzehnte überdauern.

Einleitung

Die Carbonatisierung von Beton ist seit spektakulären Schäden an grossen Bauobjekten medienwürdig geworden. Da-

mit verbunden sind Informationen, die auf mangelnder Sachkenntnis beruhen und das Vertrauen in den Werkstoff Beton beeinträchtigen. Es soll deshalb im folgenden versucht werden, das Wesen der Carbonatisierung des Betons dem Baufachmann näherzubringen, indem

nach einem grundlegenden Teil auf praktische Aspekte hingewiesen wird.

Das Phänomen der Betoncarbonatisierung wird im allgemeinen im Zusammenhang mit der «Dauerhaftigkeit» erörtert. Dieses Thema ist nicht neu, hat es doch die Baufachleute seit jeher beschäftigt. So hat auch im Frühjahr 1984 eine Studententagung in Zürich stattgefunden [1], an welcher die verschiedenen Aspekte der «Beständigkeit von Beton» beleuchtet wurden. Hier möge nur auf die enorme Ausweitung der Bautätigkeit, wie dies aus der schweizerischen Zement-Verkaufstatistik hervorgeht (1946 rund 700 000 t, 1972 5,9 Mio t), hingewiesen werden, woraus sich eine gewisse natürliche Zunahme der Schadenfälle erklärt. Entsprechend wurde jedoch auch die Erforschung der Schadenursachen intensiviert. Die Carbonatisierung des Betons ist dafür ein gutes Beispiel, denn vor gut 20 Jahren war der Begriff nur den Spezialisten bekannt, und heute wird man sich der grossen Bedeutung für die Dauerhaftigkeit der Bauwerke allgemein bewusst. Die Zahl der Publikationen zu diesem Thema ist daher stark angewachsen.