Zeitschrift: Schweizer Ingenieur und Architekt
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 103 (1985)
Heft: 25

Artikel: Zur Carbonatisierung von Beton
Autor: Koelliker, Emil
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-75832

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: 02.08.2025

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

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 Betontechnologie 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 Shanghei, 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. Damit 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 Studientagung 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-Verkaufsstatistik 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.

Grundlagen der Carbonatisierung des Betons

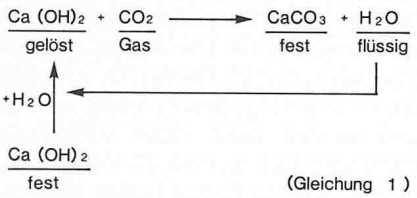
Beton – ein Mehrkomponentenwerkstoff

Beton ist bekanntlich ein erhärtetes Gemisch von Sand, Kies, Zement und Wasser. Hinzu kommt der Stahl, der ebenfalls als Komponente des Stahlbetons betrachtet werden muss.

Von diesen Stoffen sind allein die Reaktionsprodukte des Zements mit dem Wasser, also der Zementstein, an der chemischen Carbonatisierungsreaktion beteiligt.

Der Einfluss der Carbonatisierung auf den Beton

Der Zementstein besteht im wesentlichen aus den Festkörpern Calciumsilikathydrat, Calciumaluminathydrat und Calciumhydroxid sowie aus der stark alkalischen (pH 12,5) Porenlösung. Bei Zutritt von Kohlensäure, welche in der reinen Luft mit einem Volumenanteil von 0,03% vorliegt, tritt an der Flüssigkeitsoberfläche folgende Reaktion ein:



(Gleichung 1)

Das nur wenig lösliche Calciumhydroxid $Ca(OH)_2$ wird also unter Vermittlung von flüssigem Wasser in Calciumcarbonat $CaCO_3$ umgewandelt. Man kann berechnen, dass das Volumen der Festkörper leicht zunimmt. Die Reaktion umfasst alle Bestandteile des Zementsteines, und am Ende liegen Calciumcarbonat, hydratisierte Kieselsäure $SiO_2 \cdot X H_2O$ und Tonerde $Al_2O_3 \cdot X H_2O$ vor, welche stabil und praktisch wasserunlöslich sind.

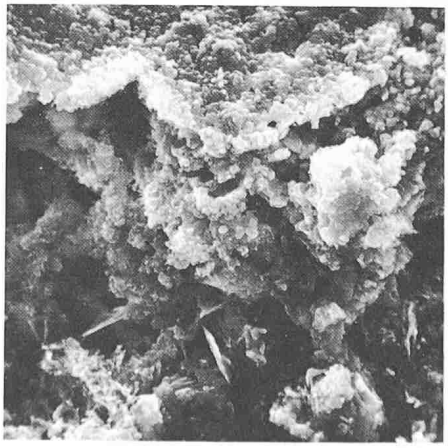
Es ist bemerkenswert, dass bei dieser Umwandlung der Zementstein der Form und weitgehend auch dem Volumen nach erhalten bleibt – die Struktur wird dichter, das Volumen schwindet nur geringfügig, die Druckfestigkeit steigt wesentlich [3]. Kurz, *der Beton wird nicht zerstört, sondern verbessert.* (Diese Aussage gilt für Portlandzementbeton, bei Verwendung anderer Zemente jedoch nur bedingt, u.U. kann ein Festigkeitsrückgang eintreten, vgl. [2].) Es gab sogar Versuche, um Betonteile industriell in einer Kohlensäureatmosphäre beschleunigt zu carbonatisieren zwecks Erhöhung der Qualität [3]. Solche Verfahren wurden offenbar aus wirtschaftlichen Gründen nicht weiter verfolgt.

Der Transport der Kohlensäure und die Rolle des Wassers

Die Geschwindigkeit der Carbonatisierung hängt entscheidend vom Transport der Kohlensäure ab. Diese liegt einerseits in der Luft vor, anderseits aber auch im Wasser (teils physikalisch, teils chemisch gebunden). Da normalerweise kein Druckgefälle besteht, erfolgt der Transport durch Diffusion, die in der Gasphase ungleich schneller als in der Flüssigphase ist. Als Transportwege stehen nur die Poren und Risse des Betons zur Verfügung. Weil die Kohlensäure durch die Carbonatisierungsreaktion verbraucht wird (vgl. weiter unten), kann sie nicht durch die alkalische Lösung diffundieren (im Unterschied zu den Chloriden), so dass die Wanderung nur in den luftgefüllten Poren erfolgen kann. Der Beton besitzt bekanntlich charakteristisch ein grosses Spektrum verschieden grosser Poren, die infolge der physikalischen Adsorption und Kondensation von Wasserdampf je nach der relativen Feuchtigkeit und je nach dem Porendurchmesser mehr oder weniger gefüllt sind. Deshalb ist der Gasaustausch am raschesten in trockener Atmosphäre, denn dann sind die Poren weitgehend mit Luft gefüllt.

Die Kohlensäure der Luft kann aber nicht direkt mit den alkalischen Bestandteilen des Betons reagieren, sondern diese müssen zuerst in Wasser gelöst werden, wie in Gleichung (1) dargestellt. Das führt dazu, dass die Carbonatisierung des Betons bei mittlerer Luftfeuchtigkeit, d.h. bei etwa 50–70% r.F., am raschesten verläuft, denn bei grosser Trockenheit wird sie bis zum Stillstand gebremst, weil der Wasserfilm fehlt, und bei hoher Feuchtigkeit sind alle Poren mit Wasser gefüllt, so dass die Carbonatisierung ebenfalls verunmöglicht wird. Dieses typische Verhalten wurde verschiedentlich experimentell bestätigt [3, 4].

Bild 1. Bruchfläche von teilweise carbonatisiertem Mörtel (REM-Aufnahme, Bildbreite = 0,042 mm). PC-Mörtel 1:3 mit W/Z 0,50 wurde nach 3 Tagen Lagerung in der Form während 91 Tagen bei 70% relativer Luftfeuchtigkeit gelagert. – Das Bild zeigt die Carbonathaut auf der Oberfläche und die (wegen der Perspektive scheinbar nadeligen) Calciumhydroxidkristalle in der tieferliegenden, nichtcarbonatisierten Zone.



Das im Beton vorliegende Wasser enthält vor allem (aber nicht nur!) Calciumhydroxid. Die Aufnahme der Kohlensäure erfolgt nun charakteristisch nur an der Wasseroberfläche, weil sich eine dichte Haut von Calciumcarbonat bildet (Bild 1) [5]. Diese ist durchlässig für Wasserdampf, aber undurchlässig für Kohlendioxid. Diese Haut ist übrigens fast stets auch auf dem trockenen Beton vorhanden und gibt ihm die helle Farbe. Das lässt sich leicht zeigen, indem sie mit verdünnter Säure weggeätzt wird: dann entsteht ein dunkler Fleck.

Die Ursache der Betonzerstörung ist die Stahlkorrosion

Es ist nicht richtig, wenn man die Carbonatisierung als Ursache der Zerstörung des Betons bezeichnet, wie es in vielen Publikationen geschieht; das Betongefüge wird nämlich erst durch die treibende Wirkung des korrodierenden Stahles gesprengt. Allerdings wird die Stahlkorrosion in der Regel (Chloridionen werden hier nicht berücksichtigt) durch die Carbonatisierung ermöglicht, weil die passivierende Wirkung der stark alkalischen Porenlösung wegfällt, denn der sogenannte pH-Wert dieser Lösung sinkt durch die Kohlensäureaufnahme von 12,5 auf unter 9. Dadurch wird der Stahl fähig zur Korrosion, er wird aktiv. Auch darüber besteht schon eine reichhaltige Literatur, vgl. z.B. [6]. Bei der Korrosion des Stahles nehmen die Korrosionsprodukte einen wesentlich grösseren Raum ein als der Stahl, und das führt zu Spannungen, die die Zerstörung des Betons bewirken.

Vom Standpunkt der Betonzerstörung her ist es deshalb interessant, von den *Voraussetzungen der Stahlkorrosion* zu sprechen. Damit Stahl rostet, braucht es *Sauerstoff und Feuchtigkeit.* Die normale Stahlkorrosion ist ein elektrochemischer Vorgang, wobei der Sauerstoff durch Depolarisation an der Kathode die Reaktionen in Gang setzt. Die Feuchtigkeit erzeugt den erforderlichen elektrolytisch leitenden Film auf dem Stahl, indem sie vor allem die vorhandenen Sulfate und Alkalien löst (das Calciumhydroxid ist im carbonatisierten Beton nicht mehr vorhanden).

Aus diesen Vorstellungen leiten sich denn auch die Bedingungen ab, unter denen normaler Betonstahl nicht rosten wird, nämlich

a) Trockenheit (schätzungsweise unter 60% relativer Luftfeuchtigkeit)
b) Abschirmung gegen den Zutritt von Sauerstoff

Die genauen Bedingungen der Verhinderung der Korrosion nach a) und b) sind leider auch heute noch zu wenig abgeklärt.

Die Carbonatisierung von Stahlbeton in der Praxis

Das Erkennen der Carbonatisierung

Allgemein üblich ist heute der sehr einfach durchzuführende Phenolphthaleintest. Dazu wird eine frische (!) Bruchfläche des Betons mit einer etwa 1-%-Lösung von Phenolphthalein in 50%igem Alkohol angefeuchtet. Nach dem Auftrocknen färbt sich der alkalische Betonkern violett, während die carbonatisierte neutrale Oberfläche sich nicht verfärbt. Mit Massstab und Lupe kann man so leicht die Carbonatisierungstiefe messen.

Eine Reihe weiterer Verfahren stehen dem Fachmann zur Verfügung, wie Dünnschliff- und Rasterelektronenmikroskopie, Röntgenstrukturanalyse u.a. Diese Methoden sind auf das Laboratorium beschränkt und sie ersetzen den an Ort und Stelle durchführbaren Phenolphthaleintest nicht.

Zur Erzeugung der frischen Bruchfläche schlägt man ein Stück Beton mit Hammer und Meissel weg. Die Betonoberfläche wird weniger gestört, wenn man mit dem Schlagbohrer ein feines Loch bohrt. Der Bohrer und die Betonoberfläche müssen dazu peinlich von alkalischem Staub gereinigt sein (keine Farbreaktion mehr). Man bohrt vorsichtig, wobei ein Gehilfe das Bohrmehl ständig mit Phenolphthaleinlösung befeuchtet (Bild 2). In dem Moment, da die alkalische Zone erreicht ist, färbt sich das Mehl deutlich violett. Der Bohrer wird herausgezogen, und die Tiefe des Loches ergibt die Carbonatisierungstiefe. Vor einer neuen Bohrung muss der Bohrer vom alkalischen Staub befreit werden. Der violette Fleck auf dem Beton ist nicht witterungsbeständig und wird deshalb in der Regel von selbst verschwinden. Er kann aber auch mit viel Wasser weggewaschen werden. Das Bohrloch wird nachher mit Fugenkitt oder Zementbrei ausgefüllt.

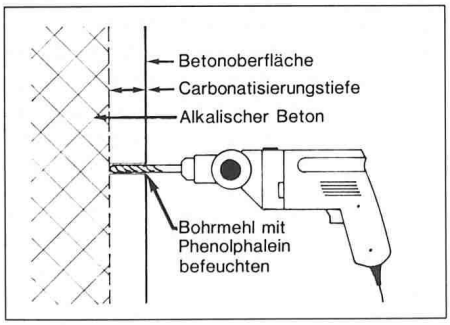
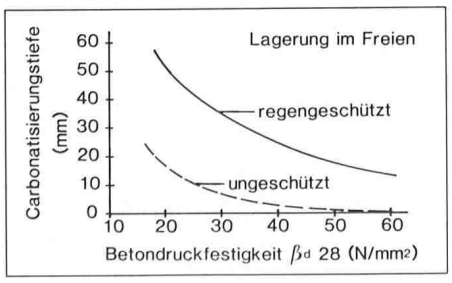


Bild 2. Ermittlung der Carbonatisierungstiefe mit dem Schlagbohrer

Bild 3. Carbonatisierungstiefe von Beton nach 30 Jahren in Abhängigkeit von der Druckfestigkeit (nach [10]).



Der Einfluss der Witterung und der Atmosphäre

Während die Temperatur einen untergeordneten Einfluss hat, spielt vor allem die Feuchtigkeit die wesentliche Rolle. Man macht immer wieder die Erfahrung, dass *dem Regen ausgesetzter Beton weniger schnell carbonatisiert als geschützter Beton* (Bild 3). Ausserdem spielen die Austrocknungsverhältnisse (Wind und Sonnenbestrahlung) wahrscheinlich eine wichtige, doch noch wenig systematisch untersuchte Rolle. Bei stets feuchten Bedingungen, also in der Regel im Boden und unter Wasser, findet keine Carbonatisierung statt (vgl. Abschnitt oben).

Das zunächst merkwürdig anmutende Phänomen des langsameren Fortschrittes auf beregneten Flächen lässt sich durch das Gleichgewicht zwischen austrocknen und benetzen, das sich im Betonkern einstellt, erklären. Dieses liegt nämlich häufig so, dass die weitere Carbonatisierung verhindert wird. Der Ort dieses Gleichgewichtes ist natürlich abhängig von der Häufigkeit der Niederschläge und vom Austrocknungsverhalten des Betons.

In *Innenräumen* schreitet die Carbonatisierung schneller fort als aussen, vor allem wenn sie beheizt sind, denn die Luftfeuchte liegt dann häufig in der Gegend von 50–70% r.F. Diese als «behaglich» empfundene Feuchtigkeit bewirkt die schnellste Reaktion. Andererseits ist die Stahlkorrosion in Innenräumen im allgemeinen kein Problem, so dass es hier selten zu Schäden kommt [7].

Heute wird die *Wirkung des sauren Regens* oft diskutiert. Der Säuregehalt des Regens kommt durch die Aufnahme der sauren Bestandteile aus der verschmutzten Atmosphäre zustande, also: Kohlensäure CO_2, schweflige Säure SO_2, Stickoxide NO_X und Salzsäure H Cl. Besonders wirksam sind die Umwandlungsprodukte Schwefelsäure H_2SO_4 und Salpetersäure H NO_3. Diese Stoffe können den Carbonatfilm auf dem Beton (siehe oben) zerstören, wirken also betonaggressiv. Das Ausmass ist allerdings nicht in erster Linie vom pH-Wert abhängig, sondern vor allem von der sogenannten Pufferkapazität. Nach [8] enthält saurer Regen 50 µ val/l H^+. Unter der Annahme, dass diese ganze Säuremenge Calciumcarbonat $CaCO_3$ auflöst und dass die Niederschlagsmenge 1000 mm/a beträgt, errechnet sich ein Abtrag von 2,5 g/m²a $CaCO_3$ bzw. rund 1 µm $CaCO_3$/a. Diese Menge ist – sofern gleichmässig verteilt – nicht bemerkbar, um so mehr, als auch normales Regenwasser eine, wenn auch sehr geringe lösende Wirkung entfaltet. Es bleibt hier festzuhalten, dass allgemein Säureeinflüsse auf den Beton auf die Oberfläche beschränkt bleiben, also nicht verdeckt sind. Die Chloridmengen im sauren Regen sind nach der gleichen Quelle derart gering, dass sie vom Standpunkt der Korrosion des Betonstahles her zu vernachlässigen sind.

Kohlensäure-angereicherte Luft entsteht durch Verbrennung von Kohlenstoff-haltigen Materialien, also vor allem Kohle und Öl. Der bereits genannte Gehalt von 0,03 Vol.% CO_2 in reiner Luft ist so gering, dass er leicht vervielfacht werden kann, denn vollständig verbrannte Luft enthält 21 Vol.% CO_2. Hohe Konzentrationen finden sich vor allem in städtischen Siedlungen, Tunnels für Motorfahrzeuge, bei Kohlekraftwerken usw. Da wir gesehen haben, dass die Carbonatisierungsgeschwindigkeit vor allem von der Diffusion abhängig ist, wird es verständlich, dass sie durch den CO_2-Gehalt der Luft direkt beeinflusst wird. Nach *Klopfer* [9] ist sie proportional $\sqrt{C}$, wenn mit C der CO_2-Gehalt der Luft bezeichnet wird.

Der Einfluss der Betonqualität

Es wurde im Abschnitt 2 dargelegt, dass die Carbonatisierung des Betons durch Gasdiffusion in den Poren erfolgt. Daraus geht direkt hervor und es entspricht einer reichen Erfahrung, dass das *Porengefüge des Betons den massgeblichen Einfluss auf die Carbonatisierungsgeschwindigkeit* ausübt (soweit wir darauf Einfluss nehmen können). Nun ist allgemein bekannt, dass die Porosität in engem Zusammenhang mit der Materialfestigkeit steht. Wir können also folgern – und das entspricht ebenso der Erfahrung –, dass *Beton mit hoher Festigkeit langsam carbonatisiert.* Der Unterschied zu Beton mit niedriger Festigkeit wird meist unterschätzt, kann er doch den Faktor 10 erreichen. Bild 3 zeigt dieses Verhalten bei Lagerung im

Freien, sowohl dem Regen ausgesetzt wie regengeschützt [10]. Ähnliche Feststellungen wurden immer wieder gemacht.

Aus dem gleichen Modell heraus ergibt sich, dass jede Art von Poren die Carbonatisierung begünstigt. Grobe Poren, wie beispielsweise Kiesnester und klaffende Risse, führen sogar zum konvektionsbedingten Gasaustausch, der meist wesentlich intensiver als der diffusionsbedingte ist. Die Wände von klaffenden Rissen carbonatisieren deshalb wie freie Oberflächen, und es leuchtet ein, dass solche Stellen ein besonders hohes Stahlkorrosionsrisiko bilden. Das Prinzip der Beschränkung der Rissbreite ist deshalb ein wichtiges Mittel bei der Verhinderung frühzeitiger Korrosionsschäden, denn Risse unter 0,35 mm Weite haben keine Bedeutung [11].

Die künstlichen Luftporen, die im Frost-Tausalz-beständigen Beton gebraucht werden, nehmen nur ein Volumen von etwa 5% ein. Deshalb wird ihre Wirkung von anderen Einflüssen überdeckt.

Die *grosse Bedeutung der Nachbehandlung des Betons* auf den Carbonatisierungsfortschritt wurde erst in den letzten etwa 10 Jahren erkannt (Bild 4). Es ist an sich verständlich, dass bei fehlender Nachbehandlung die Hydratation unterbrochen und das Gefüge deshalb porös wird. Es ist aber nicht ausgeschlossen, dass darüber hinaus bei sofort nach dem Ausschalen einsetzender intensiver Nachbehandlung ein besonderer Effekt der Behinderung der Carbonatisierung entsteht. Jedenfalls lässt die neue Entwicklung von aufgesprühten Nachbehandlungsfilmen einen Fortschritt erhoffen.

Die Prognose der Dauerhaftigkeit

Es wurde gezeigt, dass die Stahlkorrosion ermöglicht wird, wenn die Carbonatisierungsfront bis zum Stahl vorgedrungen ist. Von diesem Zeitpunkt an ist mit ernsthaften Schäden zu rechnen. Es geht aus den bisherigen Ausführungen aber auch hervor, dass die Geschwindigkeit der Carbonatisierung vielfältigen Einflüssen unterliegt. Aus diesem Grunde kann man in der Praxis komplizierte Formeln zur Vorhersage kaum gebrauchen, um so mehr als in der Regel wichtige Parameter nicht bekannt sind. Diese bleiben aber im langfristigen Durchschnitt konstant, so dass sich die Geschwindigkeit ausdrücken lässt durch die einfache Formel

$$y = k \cdot \sqrt{t} \qquad y = \text{Carbonatisierungstiefe}$$

(Gleichung 2) $\qquad t$ = Alter des Betons

Der Koeffizient k lässt sich an dem gegebenen Beton mit dem Phenolphthaleintest (Abschnitt oben) ermitteln, wenn sein Alter bekannt ist. Damit kann man den Zeitpunkt abschätzen, in welchem die Carbonatisierungsfront den Stahl erreichen wird (die Überdekkung kann zerstörungsfrei gemessen werden).

Beispiel:
Alter des Betons $t_o = 2$ Jahre
Carbonatisierungstiefe $y = 5$ mm

Koeffizient $k = \frac{5}{\sqrt{2}} = 3{,}54 \frac{\text{mm}}{\text{a}}$

Prognose des Zeitpunktes der beginnenden Stahlkorrosion:

$$t_{Pr} = \left(\frac{y}{k}\right)^2 - t_o$$

t_o = Alter des Betons
t_{Pr} = voraussichtlicher Beginn der Stahlkorrosion

Überdeckung des Betonstahles y	Carbonatisierung erreicht Stahl nach weiteren $t_{Pr} = [10/3{,}54]^2 - 2$
10 mm	= 6 Jahren
20 mm	30 Jahren
25 mm	48 Jahren
30 mm	70 Jahren

Dieses Vorgehen berücksichtigt nicht, dass die Carbonatisierung längs klaffenden Rissen fast ebenso schnell wie an der Oberfläche vor sich geht. Solche Verhältnisse müssen gesondert in Rechnung gestellt werden.

Der Schutz gegen Zerstörung des Betons infolge Carbonatisierung

Wir haben gesehen, dass der Beton durch die Korrosion des Stahles zerstört wird. Es geht also in erster Linie um die Verhinderung dieses Vorganges. Das kann einerseits durch Erhalten der passivierenden Wirkung (= alkalische Reaktion) der Umgebung, anderseits aber auch durch Verminderung der Korrosionsanfälligkeit des Stahles erreicht werden.

Die Überdeckung des Stahles mit Beton

Verfolgte man ursprünglich mit der Betonüberdeckung nur das Ziel der einwandfreien Kräfteübertragung, so hat man doch schon früh die korrosionsschützende Wirkung erkannt [13]. Seither wurden in den Vorschriften die Ansprüche erhöht, wie aus der Tabelle hervorgeht.

Mit den zahlenmässigen Vorschriften wird natürlich der grosse Einfluss der Betonqualität nicht erfasst. Man geht jedoch davon aus, dass bei anspruchsvollen Bauteilen der Betonqualität eine entsprechende Bedeutung gegeben wird (Festigkeitsanforderung). Im Beispiel im vorangehenden Abschnitt wird gezeigt, wie stark eine erhöhte Überdekkung wirkt.

Die Wirkung von organisch gebundenen Schutzschichten auf Beton

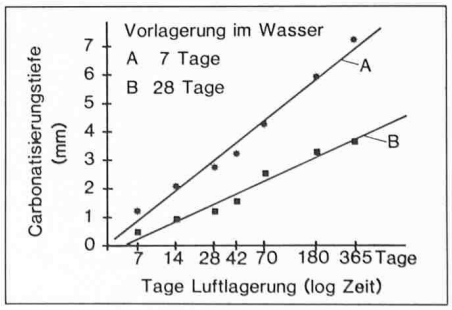
Eine Diskussion der grossen Vielfalt der Möglichkeiten, mit organisch gebundenen Werkstoffen den Beton gegen Carbonatisierung zu schützen, würde den Rahmen dieses Beitrages sprengen. Daher mögen hier nur einige grundsätzliche Erwägungen wiedergegeben werden.

Schutz gegen Carbonatisierung bedingt eine Verlangsamung des Gasaustausches. Die Kohlensäure ist allerdings nicht das einzige Gas, das für den Beton wichtig ist, denn der Wasserdampf gehört ebenso dazu. Man hat gelernt, dass die Dampfdurchlässigkeit von sehr grosser Bedeutung ist. Man kann nun näherungsweise davon ausgehen, dass Materialien mit grosser Dampfdurchlässigkeit auch eine grosse Durchlässigkeit für CO_2 besitzen und deshalb einen geringen Carbonatisierungsschutz bewirken. Allerdings ist es nicht zulässig, diese beiden Eigenschaften gleichzusetzen, denn das CO_2-Molekül ist grösser als H_2O. Das ist vor allem bei den filmbildenden Schichten wichtig.

Organisch gebundene Schichten haben eine hydrophobierende Wirkung. Das bedeutet, dass der Beton wohl austrocknen kann, dass er aber durch Regen nicht mehr befeuchtet wird. Er wird also so schnell carbonatisieren, wie wenn er vor Regen geschützt wäre (vgl. Abschnitt oben). Hydrophobierende Imprägnierungen können deshalb einen negativen Effekt haben.

Infolge der dampfbremsenden Wirkung von Anstrichen und Beschichtungen wird das Feuchtigkeitsprofil im Beton verändert. Da es sehr lange geht, bis guter Beton ausgetrocknet bzw. im Feuchtegleichgewicht mit der Umgebung ist, bedeutet das in der Regel eine Vergrösserung des Wassergehaltes in

Bild 4. Einfluss der Nachbehandlung auf den Carbonatisierungsfortschritt von PC-Mörtel mit W/Z 0,50, Lagerung bei 65% relativer Feuchte (nach [12]).



Jahr	A	B	C	D	
1909 [1]	-	-	-	-	
1915 [2]	20	10			A = Balken B = Platten
1935 [3]	10	15	20	30	A = Platten geschützt B = Platten im Freien C = Trägerrippen geschützt D = Trägerrippen im Freien
1956 [3]	10	20			A = dauernd der Witterung entzogen B = übrige Fälle
1968 [3]	15	25	10	50	A = dauernd der Witterung entzogen B = der Witterung ausgesetzt C = Vorfabrikation D = Maximum
1984 [4]	20	30	35		A = dauernd der Witterung entzogen B = übrige Fälle geschalt C = übrige Fälle ungeschalt

[1] Schweiz. Kommission des armierten Betons
[2] Verordnung des Post- und Eisenbahndepartements
[3] SIA-Norm
[4] SIA-Norm-Entwurf 162 (1984)

Die geschichtliche Entwicklung der schweizerischen Stahlüberdeckungsvorschriften (Masse in mm)

der Nähe der Oberfläche, also eine Verlangsamung der Carbonatisierung (Abschnitt oben).

Diese Ausführungen mögen darlegen, dass die Wirkung von Schichten auf dem Beton komplex ist. Eine Berechnung der Carbonatisierung von oberflächenbehandeltem Beton [9] kann daher nur Näherungscharakter haben.

Hydraulisch gebundene Schichten auf Beton

Konventionelle Verputze mit ein- oder mehrschichtigem Aufbau carbonatisieren meist rasch, weil sie porös sind und niedrige Festigkeit haben. Hingegen besitzen zementgebundene Putze (sog. Sockelputz) meist hohe Festigkeit, dichtes Gefüge (wenn sie mindestens 7 Tage nachbehandelt worden sind) und dementsprechend hohe Schutzwirkung. Ähnlich gute Ergebnisse lassen sich mit qualitativ hochwertigem Spritzbeton erzielen [1].

Um solche Schichten aufzutragen, ist es nicht notwendig, den carbonatisierten Beton zu entfernen, sofern er hart und von guter Qualität ist. Selbstverständlich bedarf der Beton der gründlichen Reinigung und Sanierung von Fehlstellen. Die Dauer der Schutzwirkung hängt - bei sonst gleicher Qualität - allerdings von der Schichtstärke ab, und aus diesem Grund kann die Entfernung der carbonatisierten Schicht zweckmässig sein.

Schutzmassnahmen auf der Bewehrungsseite

Diese Fragen gehören nicht zum Thema unserer Betrachtung. Dennoch möge darauf hingewiesen werden, dass es verschiedene Massnahmen materialtechnischer wie konstruktiver Art gibt, um auf grosse Dauerhaftigkeit des Bauwerkes hinzuwirken (siehe z.B. [7]).

Ausblick

Die alten Römer verwendeten für ihren Beton Kalkhydrat und puzzolanische Stoffe als Bindemittel. Viele Bauwerke aus dieser Zeit sind erhalten geblieben, obwohl die meisten in dieser Zeit voll durchcarbonatisiert sind. Heutiger Portlandzement bildet beim Erhärten sehr ähnliche Verbindungen, so dass unser Beton sehr gute Voraussetzungen für eine grosse Dauerhaftigkeit mitbringt. Leider schützt carbonatisierter Beton den Stahl nicht mehr vor dem Rosten, und das kann die Dauerhaftigkeit von Stahlbeton wesentlich einschränken.

Die Diskussion des Phänomens zeigt, dass der Beton bei einwandfreier Qualität und Verarbeitung dem Stahl ohne weiteres mindestens während vieler Jahrzehnte Schutz gewähren kann. Eine Überwachung der Bauwerke ist nötig, um allfällige Mängel frühzeitig erkennen und beheben zu können. Prüfverfahren gestatten eine Prognose des Eintretens von Stahlkorrosionsschäden, so dass gegebenenfalls dieser Zeitpunkt mit Schutzmassnahmen hinausgezögert werden kann.

Adresse des Verfassers: *Dr. E. Koelliker,* Technische Forschungs- und Beratungsstelle der Schweizerischen Zementindustrie (TFB), Lindenstrasse 10, 5103 Wildegg.

Literaturhinweise

[1] SIA-Dokumentation Nr. 72, Referate der Studientagung «Beständigkeit von Stahlbeton», 3./4. April 1984 in Zürich
[2] *W. Manns und O. Schatz,* Betonstein-Zeitung 4 (1967), 148-156
[3] *M. Vénuat* et *J. Alexandre,* Revue des Matériaux de Construction Nr. 639, Dezember 1968, 469-481, Nr. 640, Januar 1969, 5-15
[4] *G. Verbeck,* ASTM Spec. Techn. Publ. Nr. 205 (1958)
[5] *E. Koelliker,* RILEM Symp. Carbonation of Concrete, Wexham Springs 1976
[6] *B. Elsener* und *H. Böhni,* Schweizer Ingenieur + Architekt 14, 1984, 264-269
[7] 12 CRC Committee, Corrosion of reinforcement and prestressing tendons, Mat. Constr. (RILEM) Nr. 51, Mai-Juin 1976, 187-206
[8] *W. Stumm* und *R. Righetti,* NZZ vom 6. Oktober 1982
[9] *H. Klopfer,* Bautenschutz + Bausanierung 1, Nr. 3 (1978), 86-97
[10] *Peter Nischer,* Zement und Beton 29, H. 1, 11-15 (1984)
[11] *Schiessl,* CEB-Working Guide for Durable Structures, Part 1 - Protection of Reinforcement (1983)
[12] Nach unveröffentlichten Versuchen der TFB
[13] B. Zschokke, Schweiz. Bauzeitung 68 (1916), 285-289