

Zeitschrift: Cementbulletin
Herausgeber: Technische Forschung und Beratung für Zement und Beton (TFB AG)
Band: 67 (1999)
Heft: 12

Artikel: Karbonisierung von Betonen
Autor: Hunkeler, Fritz / Hermann, Kurt
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-153855>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. 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. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

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. [Voir Informations légales.](#)

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. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 04.04.2025

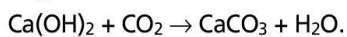
ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Karbonatisierung von Betonen

Das bekannte \sqrt{t} -Gesetz eignet sich zur Abschätzung des Karbonatisierungsschritts von Betonen unter kontrollierten klimatischen Bedingungen (vor Regen geschützte Bauteile, Laborversuche). Für Betone, die häufigen Feuchtigkeitsänderungen unterworfen sind, sagt das \sqrt{t} -Gesetz zu hohe Karbonatisierungstiefen voraus. Die Gefährdung der Bewehrung durch Korrosion wird dadurch oft stark überschätzt.

Kohlendioxid (CO_2) ist in der Luft normalerweise in einer Konzentration von 0,03 Volumen-% enthalten. Grössere CO_2 -Konzentrationen liegen im Bereich stark befahrener Strassen, Tunnels und Verbrennungsanlagen vor.

Während der so genannten Karbonatisierung reagiert CO_2 mit Calciumhydroxid ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) im Zementstein; es entsteht Calciumcarbonat (CaCO_3):



Diese Reaktion läuft nur in Gegenwart von Wasser ab. Sie gibt die Abläufe während der Karbonatisierung nur unvollständig wieder. Im Kasten «Chemie der Karbonatisierung» wird deshalb etwas ausführlicher darauf eingegangen.

Die Karbonatisierung bewirkt grundlegende Änderungen im Aufbau des Zementsteins, unter anderem [3]:

- Zunahme der Druckfestigkeit
- Zunahme der Oberflächenhärte
- Verbesserung des Abriebwiderstands.

Diesen meist erwünschten Änderungen stehen auch unerwünschte gegenüber, beispielsweise das Karbonatisierungsschwinden (Schwindmass in der Grössenordnung des Schwindmasses beim Trocknungsschwinden) sowie eine mögliche Beeinträchtigung

des Korrosionsschutzes der Bewehrung.

Korrosionsschutz der Bewehrung

Grundsätzlich ist Stahl in Beton vor Korrosion geschützt, denn unter der Wirkung des stark alkalischen Zementleims bildet sich auf seiner Oberfläche spontan eine sehr dünne, lückenlose und fest haftende Schutz-

Chemie der Karbonatisierung

Die Karbonatisierung von Betonen ist die Folge chemischer Reaktionen der alkalischen Komponenten des Zementsteins (NaOH , KOH , $\text{Ca}(\text{OH})_2$, Calciumsilikate und Calciumsilikathydrate) mit Kohlendioxid (CO_2).

Calciumoxid und Calciumhydroxid sind unter anderem in den folgenden Reaktionen involviert.

- Reaktion von $\text{Ca}(\text{OH})_2$:

$$\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O}$$
- Reaktion von Calciumsilikathydrat (CSH):

$$3 \text{CaO} + 2 \text{SiO}_2 + 3 \text{H}_2\text{O} + 3 \text{CO}_2 \rightarrow 3 \text{CaCO}_3 + 2 \text{SiO}_2 + 3 \text{H}_2\text{O}$$
- Reaktion mit Tricalciumsilikat (C_3S):

$$3 \text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 + 3 \text{CO}_2 + m \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{SiO}_2 \cdot m \text{H}_2\text{O} + 3 \text{CaCO}_3$$
- Reaktion mit Dicalciumsilikat (C_2S):

$$2 \text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 + 2 \text{CO}_2 + m \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{SiO}_2 \cdot m \text{H}_2\text{O} + 2 \text{CaCO}_3$$

Quelle: [10]

schicht. Diese Passivschicht aus Eisenoxiden verhindert Korrosion praktisch vollständig. Allerdings ist sie bei pH-Werten unter 11,0–11,5 nicht mehr stabil; in Anwesenheit von

Wasser und Sauerstoff besteht ein Korrosionsrisiko für die Bewehrung. Der pH-Wert von Betonporenwasser ist $> 12,5$. Dieser Wert bleibt bestehen, so lange das in CaCO_3 umgewandelte $\text{Ca}(\text{OH})_2$ laufend durch $\text{Ca}(\text{OH})_2$ aus dem Zementstein ersetzt werden kann. Wenn kein $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (und keine der anderen wasserlöslichen basischen Verbindungen) mehr mit dem Porenwasser in Kontakt steht, sinkt dessen pH-Wert auf unter 9–10, je nach Exposition, Zementart usw. Korrosionsgefahr besteht, sobald die Karbonatisierungsfrost die Bewehrung erreicht. Wegen Inhomogenitäten in der Betonzusammensetzung und im Betongefüge weist die Karbonatisierungsfrost meist Maxima und Minima auf. Auch SO_2 und NO_x aus der Luft können den pH-Wert des Porenwassers senken. Da diese Gase in noch geringerer Konzentration als CO_2 vorliegen, ist ihr Beitrag in der Regel unbedeutend.

Messung der Karbonatisierungstiefe

Bei Untersuchungen von Betonen auf das Fortschreiten der Karbonatisierung wird im Allgemeinen ein einfaches Verfahren verwendet: der Nachweis mit Phenolphthalein. Phenolphthalein ist ein so genannter

pH-Indikator, dessen Farbe sich im pH-Bereich 8,3–10,0 von Rotviolett nach Farblos verändert.

In der Regel wird eine 1%ige Phenolphthaleinlösung in Ethanol oder in einem Ethanol-/Wasser-Gemisch auf die frische Bruchfläche eines Bohrkerns bzw. Prüfkörpers gespritzt. Die Farbe des karbonatisierten Bereichs ändert sich nicht, während der Zementstein des nicht karbonatisierten Bereichs violett eingefärbt wird.

Ein alternatives Verfahren zur Bestimmung der Karbonisierungstiefe an Bauwerken und Belägen besteht darin, Löcher zu bohren und das Bohrmehl laufend zu untersu-

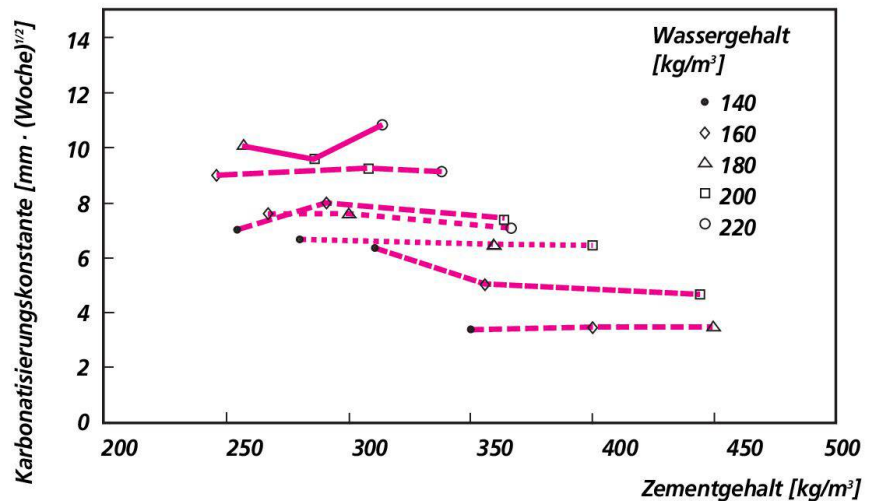


Abb. 1 Einfluss des Zementgehalts auf die Karbonatisierung (Laborversuche; Karbonatisierungskonstante: s. Gleichung (1)) nach [2].

chen. Beispielsweise wird eine Bohreinrichtung beschrieben, mit der bis rund 40 mm Tiefe sowohl der pH-Wert (und damit die Karbonisierungstiefe) als auch der Chloridgehalt in Abhängigkeit von der Bohrtiefe laufend ermittelt wird [5]. Für den Einsatz in der Praxis eignet sich dieses Verfahren noch nicht.

Schnellkarbonatisierung

Die Karbonatisierung ist nicht zuletzt wegen des niedrigen CO₂-Gehalts in

der Luft ein langsamer Prozess. Sie lässt sich durch die Erhöhung der CO₂-Konzentration wesentlich beschleunigen. Davon wird bei der Bestimmung des Karbonisierungswiderstands von Betonen häufig Gebrauch gemacht.

Beim TFB-Verfahren [6] werden die Probekörper bei 60 % r.F. unter einer reinen CO₂-Atmosphäre gelagert. Die Karbonisierungstiefe wird mit dem Phenolphthaleintest nach 0, 9, 18 und 36 Tagen ermittelt. Derart hohe CO₂-Konzentrationen (gut das 3000-fache der natürlichen Konzentration!) sind nicht unbedingt notwendig. In vergleichenden Untersuchungen wurde beispielsweise bei einem CO₂-Gehalt von 4 Vol.-% eine rund 50 Mal grössere Karbonisierungsgeschwindigkeit als bei «normaler» Laborluft (0,03 Vol.-%) gemessen [7].

Einflüsse auf die Karbonatisierung

Die Karbonisierungsgeschwindigkeit eines Betons hängt von vielen Faktoren ab. Eine Auswahl davon wird hier besprochen.

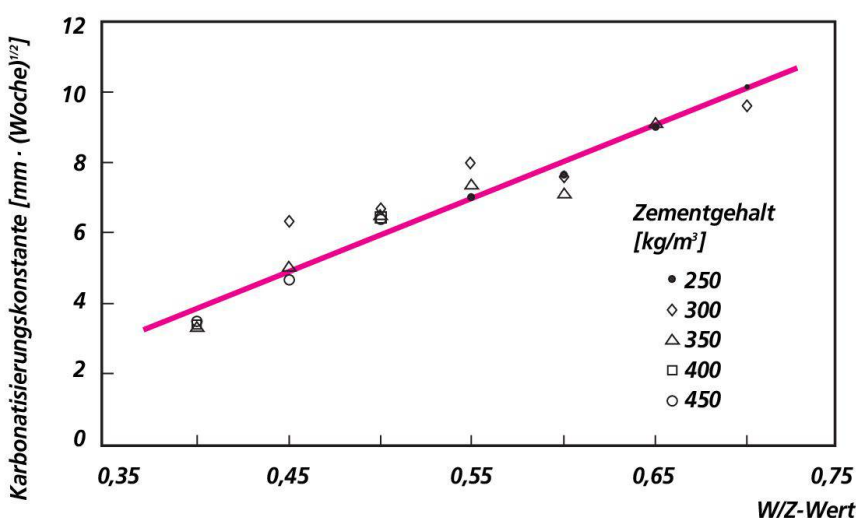


Abb. 2 Einfluss des W/Z-Werts auf die Karbonatisierung (Laborversuche; Karbonatisierungskonstante: s. Gleichung (1)) nach [2].

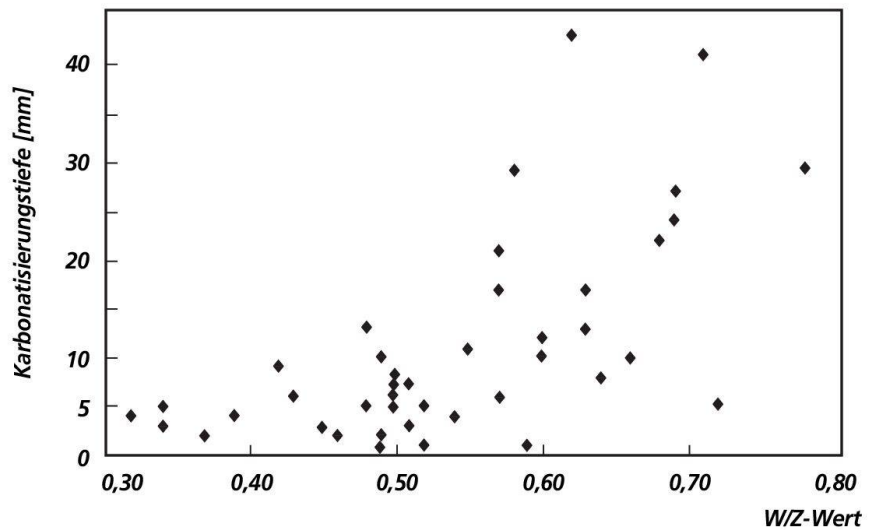


Abb. 3 Einfluss des W/Z-Werts auf die Karbonatisierung von Betonen in 50 bis 68 Jahre alten Brücken nach [8].

Zementart und -menge, W/Z-Wert
In Betonen mit Portlandzementen werden teilweise geringere Karbonatisierungstiefen beobachtet als in vergleichbaren Betonen mit Hüttensandzementen. Dies ist verständlich, denn der Ca(OH)_2 -Gehalt im Zementstein aus Portlandzement beträgt rund 25 Massen-%, derjenige im Zementstein aus Hüttensandzement aber nur rund 10 Massen-% (hängt vom Hüttensandgehalt ab).

Der pH-Wert des Porenwassers wird vor allem vom Gehalt an Natriumoxid (Na_2O), Kaliumoxid (K_2O) und Calciumoxid (CaO) bzw. der daraus gebildeten Hydroxide (NaOH , KOH , Ca(OH)_2) der Klinkermineralien bestimmt. Der Fortschritt der Karbo-

natisierung hängt deshalb nicht nur vom Ca(OH)_2 , sondern auch vom Na_2O - und vom K_2O -Gehalt ab [16]. Zum Einfluss der Zementmenge auf die Karbonatisierungstiefe wurden verschiedene Untersuchungen gemacht. In *Abbildung 1* sind Resultate einer Untersuchung mit Portlandzementen dargestellt [2]. Sie zeigen, dass der Einfluss des Zementgehalts im Vergleich zum Einfluss des W/Z-Werts gering ist (W/Z-Bereich von 0,40 bis 0,70). Die Rolle des W/Z-Werts geht auch aus *Abbildung 2* hervor, in der die Karbonatisierungstiefe in Funktion des W/Z-Werts dargestellt ist.

Diese Resultate stammen aus Laborversuchen mit beschleunigter Karbonatisierung. Eine ausgedehnte Untersuchung von 50 bis 68 Jahre alten Brücken in England lieferte die in *Abbildung 3* zusammengefassten Resultate. Der Zementgehalt betrug zwischen 250 und 300 kg/m^3 . Erwähnenswert ist die Tatsache, dass die Karbonatisierungstiefen bis zu einem W/Z-Wert von 0,55 unter 15 mm liegen.

Zusatzstoffe

Puzzolanisch wirkende Zusatzstoffe vermindern den Ca(OH)_2 -Gehalt und reduzieren dadurch den Karbonatisierungswiderstand eines Betons. Ihre Menge sollte deshalb beschränkt werden [9]. Allerdings bewirken Zusatzstoffe wie Silicastaub ein dichteres Gefüge.

Dichtigkeit des Betons

Ein dichteres Gefüge führt zu einer geringeren Karbonatisierungsgeschwindigkeit. Transportparameter wie der Wasseraufnahme-, der Gasdiffusions- und der Gaspermeabilitätskoeffizient (s. *Abbildung 4*) eignen sich deshalb als grobes Mass für den Karbonatisierungswiderstand.

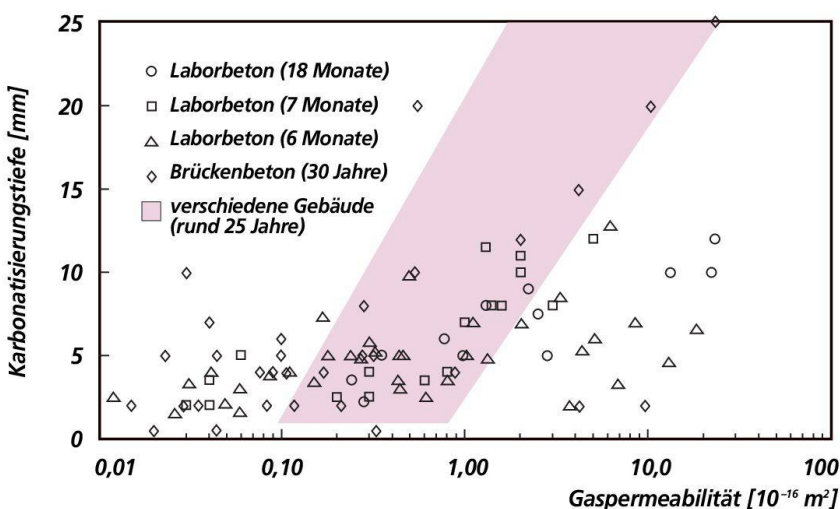


Abb. 4 Karbonatisierung in Abhängigkeit von der Gaspermeabilität [10].

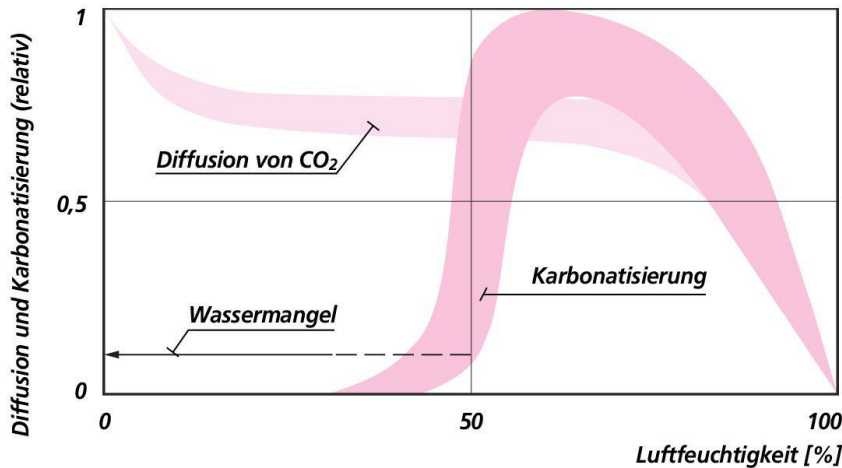


Abb. 5 Abhängigkeit der Diffusionsgeschwindigkeit von CO_2 und der Karbonatisierungsgeschwindigkeit von der Luftfeuchtigkeit [1].

Druckfestigkeit

Dichter Zementstein bedeutet in der Regel auch höhere Druckfestigkeit. Deshalb darf auch die Druckfestigkeit als grobes Mass für den Karbonatisierungswiderstand verwendet werden.

Luft- und Betonfeuchtigkeit

Die Diffusionsgeschwindigkeit von CO_2 ist in trockenem oder wenig feuchtem Beton um 3 bis 4 Grössenordnungen höher als in völlig durchnässtem Beton, in dem folglich praktisch keine Karbonatisierung stattfindet.

Doch auch trockener Beton karbonatisiert nicht, da für die Reaktion frei bewegliches Wasser benötigt wird. Tatsächlich ist die Karbonatisierungsgeschwindigkeit im Feuchtigkeitsbereich 50–70 % am grössten (Abbildung 5).

Beton, der vor Niederschlägen geschützt ist, karbonatisiert schneller als Beton, der Niederschlägen ausge-

LITERATUR

Der vorliegende Artikel basiert im Wesentlichen auf Unterlagen zur TFB-Fachveranstaltung «Dauerhafte Betonbauwerke – unser Ziel» [1].

- [1] Hunkeler, F., «Einfluss der Betonqualität auf den Chlorid- und Karbonatisierungswiderstand», Unterlagen zur TFB-Veranstaltung Nr. 974 762 «Dauerhafte Betonbauwerke – unser Ziel» vom 13. Mai 1998 in Wildegg.
- [2] Loo, Y.H., Chin, M.S., Tam, C.T., and Ong, K.C.G., «A carbonation prediction model for accelerated carbonation testing of concrete», Magazine of Concrete Research 46 [168], 191–200 (1994).
- [3] Koelliker, E., «Die Carbonatisierung von Stahlbeton – ein Überblick», Beton- und Stahlbetonbau 85 [6], 148–153 und [7], 186–189 (1990).
- [4] Weigler, H., und Karl, S., «Beton: Arten – Herstellung – Eigenschaften», Ernst & Sohn, Berlin (1989), Seiten 422–427.
- [5] «Bohrverfahren zur Bestimmung der Karbonatisierungstiefe und des Chloridgehalts von Beton», Wissenschaftliche Informationen Bundesamt für Strassenwesen, info 2/98, www.bast.de/PUBLICAT/Basisinfo/Info1998/info9802.htm.
- [6] Piguet, A., «Schnellverfahren zur Beurteilung der Betonkarbonatisierung», Cementbulletin 56 [8], 1–8 (1988).
- [7] Ho, D. W. S., and Lewis, R. K., «Carbonation of concrete and its prediction», Cement and Concrete Research 17 [3], 489–504 (1987).
- [8] Brown, J. R., «Factors affecting steel corrosion in concrete bridge structures», IABSE Symp. 1989, Seiten 543–548.
- [9] Manns, W., «Gemeinsame Anwendung von Silicastaub und Steinkohlenflugasche als Betonzusatzstoff», Beton 47 [12], 716–720 (1997).
- [10] Jacobs, F., «Dauerhaftigkeitseigenschaften von Betonen», Beton 49 [5], 276–282 (1999).
- [11] Wierig, H.-J., «Longtime studies on the carbonation of concrete under normal outdoor exposure», Proc. of the Rilem Seminar on the durability of concrete structures under normal outdoor exposure, Institut für Baustoffkunde und Materialprüfung, Universität Hannover (1984), Seiten 239–249.
- [12] Schröder, F., Smolczyk, K., Grade, K., Vinkeloe, R., und Roth, R., «Einfluss der Luftkohlenensäure und Feuchtigkeit auf die Beschaffenheit des Betons als Korrosionsschutz für Stahleinlagen», Deutscher Ausschuss für Stahlbeton 182, 1–28 (1967).
- [13] Bunte, D., «Zum karbonatisierungsbedingten Verlust der Dauerhaftigkeit von Aussenbauteilen aus Stahlbeton», Deutscher Ausschuss für Stahlbeton 436, 1–172 (1993).
- [14] Frey, R., «Untersuchung der 20jährigen Karbonatisierung von Betonen», Beton 43 [3], 116–120 (1993).
- [15] Sickert, G., «Modellerweiterung für den Carbonatisierungsfortschritt im Beton», Betonwerk und Fertigteil-Technik 63 [12], 74–88 (1997).
- [16] Reschke, T., und Gräf, H., «Einfluss des Alkaligehalts im Zement auf die Carbonatisierung von Mörtel und Beton», Beton 47 [11], 664–670 (1997).
- [17] Martin, H., Raue, A., und Schiessl, P., «Karbonatisierung von Beton aus verschiedenen Zementen», Betonwerk und Fertigteil-Technik 41 [12], 588–590 (1975).

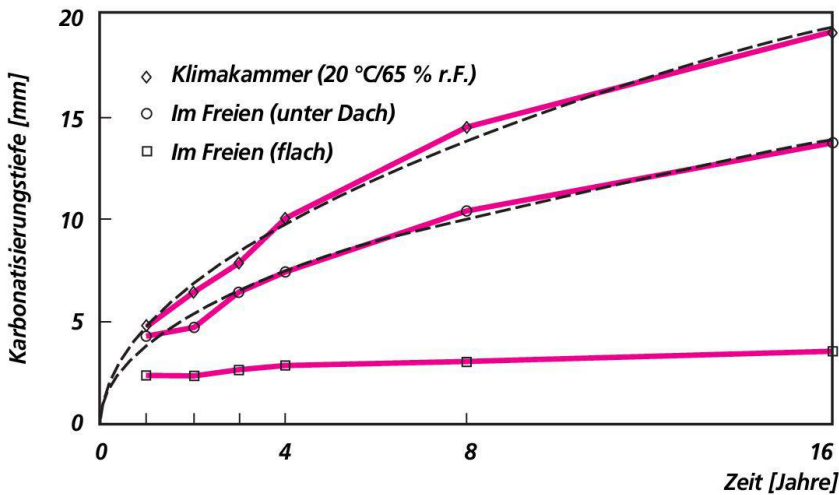


Abb. 6 Zeitlicher Verlauf der Karbonatisierungstiefe. Die gestrichelte Linie entspricht dem Verlauf gemäss dem \sqrt{t} -Gesetz [11].

setzt ist, da genügend Wasser und CO_2 verfügbar sind (Abbildung 6).

Zeitlicher Verlauf der Karbonatisierung

Bei Bauwerken, in denen die Karbonatisierung bereits relativ stark fortgeschritten ist, interessiert vor allem der Zeitpunkt, zu dem die Karbonatisierungsfrent die Bewehrung erreicht. Es hat deshalb nicht an Versuchen gefehlt, den Karbonatisierungsfortschritt aufgrund verfügbarer Daten (insbesondere Alter des Betons und aktuelle Karbonatisierungstiefe) zu berechnen.

Seit den Sechzigerjahren bekannt ist das \sqrt{t} -Gesetz, das auf dem 1. Fick'schen Gesetz basiert:

$$(1) \quad x = (2 D_G [c_1 - c_2]/a)^{1/2} \cdot t^{1/2} \\ = A \cdot t^{1/2}$$

x Karbonatisierungstiefe zur Zeit t [m]

D_G Diffusionskoeffizient von CO_2 im karbonatisierten Beton [m^2/s]

a für Karbonatisierung der alkalischen Bestandteile notwendige Menge CO_2 [g/m^3]

c_1 CO_2 -Konzentration auf Aussenseite [g/m^3]

c_2 CO_2 -Konzentration an Karbonatisierungsfrent [g/m^3]

t Zeit [s]

A Karbonatisierungskonstante [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1/2}$]

Bei der Herleitung von Gleichung (1) wurden verschiedene Vereinfachungen gemacht, die in Tabelle 1 zusammengefasst sind. Wegen diesen Ver-

einfachungen gilt das \sqrt{t} -Gesetz nur unter konstanten klimatischen Bedingungen, wie sie beispielsweise bei vor Regen geschützten Bauteilen oder unter Laborbedingungen vorliegen (Abbildung 6).

Bereits 1967 wurde darauf hingewiesen, dass «der Karbonatisierungsfortschritt von häufig und intensiv angefeuchtetem Beton mit zunehmendem Alter so gering wird, dass man praktisch von einem Stillstand sprechen kann» [12].

Die ungenügende Realitätsnähe des \sqrt{t} -Gesetzes hat zu zahlreichen Verbesserungsvorschlägen geführt. Bereits in den Siebzigerjahren wurde eine Erweiterung vorgeschlagen (Gleichung 2), in der sowohl der Einfluss der Betonfeuchtigkeit auf den CO_2 -Diffusionskoeffizienten D_G als

Annahme

Der CO_2 -Diffusionskoeffizient D_G ist zeitlich und örtlich konstant.

Der Koeffizient a in Gleichung (1) ist unabhängig von der Tiefe.

Es findet keine Rückdiffusion von $\text{Ca}(\text{OH})_2$ aus dem Betoninnern statt.

Beton karbonatisiert mit konstanter Geschwindigkeit.

Realität

Der CO_2 -Diffusionskoeffizient D_G ist u. a. stark von der Betonfeuchtigkeit (Abbildung 5) und der Porosität der karbonatisierten Schicht abhängig.

Der Koeffizient a in Gleichung (1) hängt vom Hydratationsgrad und den Expositionsbedingungen (CO_2 -Gehalt der Umgebung) ab.

Wegen des durch die Karbonatisierung verursachten Konzentrationsgefälles wandert $\text{Ca}(\text{OH})_2$ vom Bauteilinnern gegen aussen.

Wegen der sich ständig ändernden Luftfeuchtigkeit karbonatisiert Beton im Freien mit zeitlich sich stark ändernden Geschwindigkeiten.

Tab. 1 Wichtige Vereinfachungen zum \sqrt{t} -Gesetz.

Messgrösse		Gleitstufe Nr. 3	Gleitstufe Nr. 4
Festigkeit			
– im Alter von 15 Jahren (g)	N/mm ²	57,8 ± 13,3	55,8 ± 9,5
– 28-Tage-Festigkeit (g)	N/mm ²	27,9 ± 5,8	28,5 ± 1,7
Zementgehalt (b)	kg/m ³	282 ± 27,5	245 ± 5
W/Z-Wert (b)		0,60 ± 0,07	0,60 ± 0,05
Porenvolumen			
– Gesamtporenvolumen (g)	Vol.-%	15,1 ± 1,5	13,7 ± 0,6
– Kapillarporenvolumen (g)	Vol.-%	13,6 ± 1,6	11,7 ± 0,8
Karbonatisierungstiefe (g)	mm	11,4 ± 2,8	12,6 ± 1,6

Tab. 2 Ergebnisse der Untersuchung an Bohrkernen der Westseite eines 15-jährigen Stahlbetonsilos (g = gemessen, b = berechnet) nach [1].

auch die Rückdiffusion des Ca(OH)₂ berücksichtigt werden. Zudem wurde die Endkarbonatisierungstiefe x_{∞} eingeführt [17].

$$(2) t = -a/b(x + x_{\infty} \cdot \ln[1 - x/x_{\infty}])$$

t Zeit

x Karbonatisierungstiefe zur Zeit t [m]

x_{∞} Endkarbonatisierungstiefe [m]

a für Karbonatisierung der alkalischen Bestandteile notwendige Menge CO₂ [g/m³]

b Hemmungskonstante: feuchteabhängiger Faktor; beschreibt Abnahme des CO₂-Diffusionskoeffizienten D_G und zusätzlichen CO₂-Bedarf wegen Ca(OH)₂-Rückdiffusion.

Auf die vielen weiteren Modifikationen des \sqrt{t} -Gesetzes (siehe z.B. [13–15]) wird hier nicht eingegangen. Das einfache \sqrt{t} -Gesetz wird leider trotz seiner beschränkten Gültigkeit weiter verwendet, um den Karbonatisierungsfortschritt von Stahlbetonbauteilen zu extrapolieren, die

Niederschlägen ausgesetzt sind. In unseren Breitengraden kann davon ausgegangen werden, dass die Karbonatisierung nach 15–30 Jahren weitgehend abgeschlossen ist; eine Ausnahme sind Bauteile mit schlechter Betonqualität. Mit dem \sqrt{t} -Gesetz aber wird der Karbonatisierungsfortschritt erheblich überschätzt. Dies lässt sich am nachfolgenden Beispiel illustrieren.

Karbonatisierung eines Stahlbetonsilos

Ein Stahlbetonsilo, das mit Beton mittelmässiger Qualität hergestellt wurde, wies nach 15 Jahren die in Tabelle 2 zusammengestellten Daten auf. In Abbildung 7 sind sowohl der aufgrund des \sqrt{t} -Gesetzes (Gleichung 1) zu erwartende weitere Verlauf der Karbonatisierung für den Beton aus der Gleitstufe 4 als auch die realistischere Extrapolation gemäss Gleichung 2 für eine Endkarbonatisierungstiefe von 15 bzw. 20 mm aufgetragen. Die Prognosen für den Karbonatisierungsverlauf nach 30 Jahren unterscheiden sich beträchtlich.

Fritz Hunkeler
und Kurt Hermann, TFB

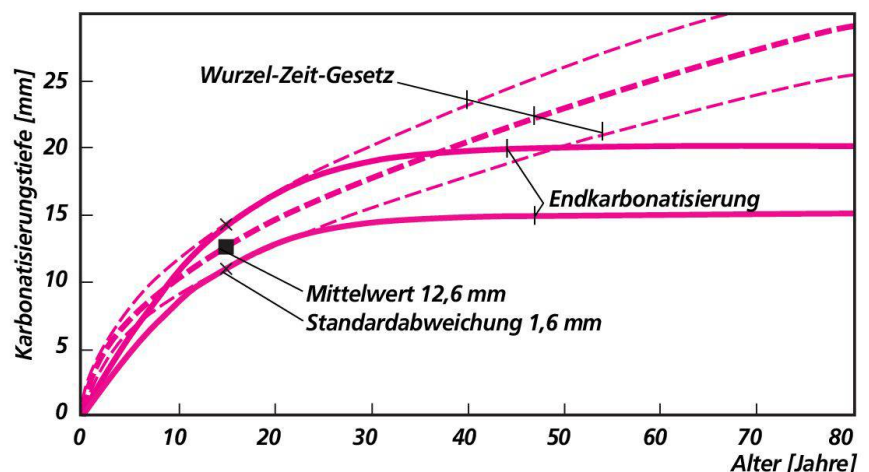


Abb. 7 Extrapolation des Karbonatisierungsfortschritts (basierend auf den Werten in Tabelle 2) mittels \sqrt{t} -Gesetz (Gleichung (1)) und mittels Gleichung (2) (siehe Text).