

# Zur Bestimmung der Carbonatisierungstiefe von Mörtel und Beton

Von Horst Grube und Jürgen Krell, Düsseldorf

## Übersicht

*Die Prüfung der Carbonatisierungstiefe des Betons dient vor allem der Beurteilung, ob die Alkalität der Porenlösung im Bereich des Bewehrungsstahls so groß ist, daß die Passivschicht, die sich auf dem Bewehrungsstahl bei hohem pH-Wert bildet und die ihn vor Korrosion schützt, stabil bleibt.*

*Für die Beurteilung der jeweiligen Carbonatisierungstiefe von Beton und Mörtel, z. B. in Abhängigkeit von der Zusammensetzung den Lagerungsbedingungen und der Zeit, ist ein einfaches und aussagekräftiges Prüfverfahren bekannt, bei dem Phenolphthalein als Indikator verwendet wird. Es hat sich jedoch gezeigt, daß das Verfahren zur Messung der Carbonatisierungstiefe nicht einheitlich durchgeführt wurde und daß daher verschiedene Prüfer an gleichen Prüfflächen zu unterschiedlichen Ergebnissen gelangten. Dieser Mangel läßt sich durch eine detaillierte Prüfanleitung weitgehend beheben. Hierzu wird ein Vorschlag unterbreitet. Neben der Verfahrensbeschreibung wird auch eine Meßlehre vorgestellt, die den Meßaufwand vermindert. Ein Ablaufdiagramm für die Prüfdurchführung und ein Ergebnisformblatt sind beigelegt.*

## 1. Allgemeines

Bei der Hydratation von Zement entstehen überwiegend Calcium- und Aluminium-Silicathydrate, ferner Alkalihydroxide und Calciumhydroxid. Letztere bewirken, daß Beton nach seiner Herstellung eine alkalische Porenlösung aufweist, deren pH-Wert im Bereich von 12 bis 13 liegt. Hierdurch sind die Voraussetzungen gegeben, daß sich auf dem Bewehrungsstahl eine korrosionsschützende Passivschicht bildet.

An freien Betonoberflächen, die der Umgebungsluft ausgesetzt sind, diffundiert Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ ) in den Beton ein und kann dabei überwiegend mit dem Calciumhydroxid unter Bildung von Calciumcarbonat reagieren [1]. Dieser Vorgang wird als Carbonatisierung bezeichnet. Durch die Carbonatisierung vermindert sich der pH-Wert der Porenlösung auf  $\text{pH} < 9$ , so daß die Voraussetzungen für eine weiterhin stabile Passivschicht auf dem Bewehrungsstahl nicht mehr gegeben sind [2].

Eine Korrosion des Betonstahls tritt jedoch nicht zwingend auf, wenn die Carbonatisierungsfront die Bewehrung erreicht hat, vielmehr ist zusätzlich ein ausreichendes Angebot von Sauerstoff und Feuchtigkeit am Bewehrungsstahl erforderlich [3].

Die Carbonatisierung beeinflusst auch andere Betoneigenschaften. Sie kann in Abhängigkeit von der Zementart die Druckfestigkeit mehr oder weniger erhöhen [4] oder die Porosität verändern [5]. Die Carbonatisierung führt zu nennenswerten Schwindverformungen [6] und kann dadurch zur sichtbaren Krakeleeribildung auf glattgeschalteten Betonoberflächen beitragen [7].

Umfangreiche Messungen der Carbonatisierung an Bauwerkbetonen werden in [8, 9] beschrieben. Sie zeigen, daß bei einem ausreichend niedrigen Wasserzementwert und hohem Hydratationsgrad ein so dichter Beton erzielt wird, daß die Carbonatisierungsfront – wenn überhaupt – erst nach vielen Jahrzehnten den planmäßig überdeckten Bewehrungsstahl erreicht. Dementsprechend wird ein dauerhafter Korrosionsschutz der Bewehrung u. a. durch die Betonzusammensetzung (insbesondere durch einen niedrigen Wasserzementwert), durch eine wasserrückhaltende Nachbehandlung (Steigerung des Hydratationsgrades) und durch eine große Betondeckung sichergestellt [2, 3, 8, 9].

Die Messung der Carbonatisierungstiefe in Abhängigkeit vom Alter des Betons und anderen Versuchsparametern, wie z. B. Betonzusammensetzung, Nachbehandlung und Lagerungsklima, gehört zu den wesentlichen Untersuchungen, um vergleichend die Dauerhaftigkeit des Korrosionsschutzes der Bewehrung im Beton zu beurteilen [10].

Die Carbonatisierung des Betons wird bei sonst gleichen Bedingungen maßgeblich vom Diffusionswiderstand des Betons gegenüber  $\text{CO}_2$  bestimmt. In erster Näherung schreitet die Carbonatisierungsfront mit der Wurzel der Zeit fort [2]; daher hat es sich als zweckmäßig erwiesen, die Carbonatisierungstiefe im Betonalter von 7, 28, 90 und 180 Tagen sowie 1, 1½, 2 und 3 Jahren zu prüfen [12].

Ein einfaches Verfahren zur Bestimmung der Carbonatisierungstiefe von Mörtel und Beton besteht darin, die pH-Wert-Änderung mit Hilfe einer geeigneten Indikatorlösung nachzuweisen. Für die Beurteilung von Beton und Mörtel hat sich hierfür eine alkoholische Phenolphthaleinlösung bewährt, deren Farbe im Bereich von  $\text{pH} > 9$  von farblos auf rot-violett umschlägt. An frischen Bruchflächen bleibt beim Aufsprühen der Lösung der carbonatisierte Bereich hell, während sich der nichtcarbonatisierte Bereich rot-violett verfärbt. Die Carbonatisierungstiefe  $d_c$  wird als Abstand der Farbumschlaggrenze zur jeweiligen Betonoberfläche bestimmt.

Für das Meßverfahren mit Indikatorlösungen gibt es bisher keine verbindliche Regelung. Verschiedentlich wurde beobachtet, daß der Feuchtigkeitsgehalt des Betons das Meßergebnis wesentlich beeinflussen kann [11]. Deshalb wird empfohlen, die mit der Indikatorlösung besprühten Flächen einen Tag an der Luft zu lagern und dann die Carbonatisierungstiefe zu messen. Am ausführlichsten wird das Prüfverfahren bisher in der vorläufigen RILEM-Empfeh-

lung CPC-18 [12] beschrieben. Sie bildet auch die Grundlage des nachstehenden Vorschlags für eine Prüfanleitung.

Bei der Anwendung des vom Prinzip her einfachen Verfahrens hat sich gezeigt, daß verschiedene Prüfer an gleichen Prüfflächen auch bei Prüfung nach [12] zu deutlich unterschiedlichen Prüfergebnissen kommen können. Deshalb werden in der Prüfanleitung Verfahrensschritte einzeln beschrieben und zusätzliche Festlegungen vorgeschlagen, um die Reproduzierbarkeit des Meßergebnisses zu verbessern. Das beschriebene Verfahren hat sich im Forschungsinstitut der Zementindustrie bewährt.

## **2. Bestimmung der Carbonatisierungstiefe**

### **2.1 Probekörper**

Im Labor hat sich die Herstellung von Balken mit einem Querschnitt von  $10 \times 10 \text{ cm}^2$  für Beton mit einem Größtkorn  $\leq 16 \text{ mm}$  und von  $15 \times 15 \text{ cm}^2$  für Beton mit einem Größtkorn  $\leq 32 \text{ mm}$  bewährt, da hier zu verschiedenen Prüfzeitpunkten jeweils Scheiben abgespalten werden können. (Bei einer Länge von 70 cm lassen sich z. B. 14 Scheiben mit einer Dicke von 5 cm gewinnen.) Zur Untersuchung des Carbonatisierungsfortschritts an Mörteln haben sich Prismen  $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$  bewährt. Für Einzelmessungen können auch Würfel oder Zylinder geprüft werden. Die maximal meßbare Carbonatisierungstiefe wird von den Probekörperabmessungen und den auftretenden „Eckeinflüssen“ gemäß Abschnitt 2.6 bestimmt. Die Probekörpergröße ist entsprechend der zu erwartenden Carbonatisierungstiefe zu wählen.

Bei der Herstellung der Probekörper ist darauf zu achten, daß kein Schalöl (Trennmittel) auf dem Probekörper verbleibt, da sonst eine „Imprägnierung“ der Proben erfolgen kann. Es hat sich als zweckmäßig erwiesen, die Formen vor dem Betonierbeginn mit einem trockenen Lappen auszuwischen.

Zur Bestimmung der Carbonatisierungstiefe an Bauwerken oder Bauteilen hat sich die Untersuchung von Bohrkernen  $\varnothing 10$  bis  $15 \text{ cm}$  aus der zu prüfenden Betonoberfläche bewährt. Die Prüfung sollte innerhalb von 2 bis 3 Tagen nach der Entnahme des Bohrkerns erfolgen, um einen Einfluß möglicher Carbonatisierung von den Bohrkernmantelseiten klein zu halten.

Für eine orientierende Beurteilung, ob die Carbonatisierungsfront die oberen Bewehrungslagen bereits erreicht hat, reichen ein Aufstemmen des Betons (z. B. mit Hammer und Meißel) und ein Ansprühen der frischen Betonflächen mit Indikatorlösung gemäß Abschnitt 2.4 aus.

### **2.2 Lagerung**

Der Feuchtigkeitsgehalt der Proben und der  $\text{CO}_2$ -Gehalt der Umgebungsluft bestimmen maßgeblich den Carbonatisierungsfortschritt. Deshalb sind die vorgesehenen Lagerungsbedingungen genau festzulegen und über den Versuchszeitraum aufzuzeichnen. Die Lagerungsbedingungen werden im Hinblick auf das Ziel der Untersuchung ausgewählt, da die Ergebnisse bei unterschiedlicher

Lagerung, z. B. Normklima 20 °C/65 % r. F. gegenüber Freiluftlagerung, deutlich voneinander abweichen können. Es ist darauf zu achten, daß die Luft bewegt und ausgetauscht wird, damit die Luftfeuchtigkeit und der CO<sub>2</sub>-Gehalt auch am Probekörper dem planmäßigen Klima entsprechen. Die Probekörper sollen einen Abstand von mindestens 2 cm untereinander und von der Auflagefläche haben, um von allen Seiten der Luft frei zugänglich zu sein. Die Proben sind zweckmäßigerweise auf Dreikantleisten aufzulegen.

### 2.3 Herstellen der Prüfflächen

Von dem zu untersuchenden Probekörper ist eine frische Bruchfläche möglichst senkrecht zu der Probekörperfläche herzustellen, für die die Carbonatisierungstiefe bestimmt werden soll. Bohrkernne werden mittig in Richtung der Längsachse gespalten.

Bei Balken muß die abgespaltene Scheibe so dick sein, daß die Carbonatisierungstiefe nicht durch von der Stirnseite eingedrungenes CO<sub>2</sub> beeinflusst werden kann (Minstdicke 2fache Carbonatisierungstiefe). Zweckmäßigerweise untersucht man die abgespaltenen Scheiben, damit der Balken-„Rest“ ohne Verzug wieder der planmäßigen Lagerung ausgesetzt werden kann.

Das Abspalten erfolgt durch Spaltzugbeanspruchung, wobei die Last über Metallstäbe  $\varnothing$  4 bis 6 mm eingeleitet werden sollte. Bei der Verwendung von Hartfilzstreifen nach DIN 1048 ergibt sich häufig ein Ausbrechen der Bruchränder und damit eine Störung der zu beurteilenden Oberfläche.

Das Absägen von Betonscheiben erwies sich als unzuweckmäßig, da durch das nasse Sägen noch unhydratisierte Anteile des Zementes aufgeschlossen werden können, wodurch sich an der Oberfläche leicht Meßfehler ergeben. Gleiches gilt für Bohrkernmantelflächen oder geschliffene Betonflächen.

Die frische Bruchfläche ist von lose anhaftenden Bestandteilen zu reinigen. Dafür hat sich eine harte Bürste als geeignet erwiesen. Hierdurch werden Meßfehler vermieden, die entstehen können, wenn lose anhaftende Bestandteile erst nach dem Ansprühen abfallen und damit die Färbung in diesen Bereichen verlorengeht.

### 2.4 Aufbringen der Indikatorlösung

Als Indikatorlösung hat sich eine 1 %ige Phenolphthaleinlösung in 70 %igem Alkohol bewährt [12] (z. B. 10 g Phenolphthalein plus 990 g Lösungsmittel = 1 000 g Lösung). Diese Lösung erbringt eine deutlich sichtbare Farbumschlaggrenze und ist sowohl für trockene als auch für feuchte Prüfflächen geeignet.

Die Indikatorlösung ist gleichmäßig auf die Bruchfläche aufzusprühen und unter Beachtung der Aufnahmefähigkeit des Betons so zu dosieren, daß die Farbumschlaggrenze nicht verläuft. Dafür haben sich Laborsprühflaschen (z. B. Bild 1), die einen feinen Sprühnebel erzeugen, bewährt. Blumenspritzen (Zerstäuber), die z. T. auch größere Tropfen oder geschlossene Sprühstrahlen erzeugen, erscheinen ungeeignet. Um den Ansprühvorgang zu erleichtern, sind die Prüfkörper so zu lagern, daß die Bruchflächen 45 bis 80 ° zur Horizontalen geneigt sind.



Bild 1 Geeignete Laborsprühflasche

Der Ansprühvorgang sollte so oft wiederholt werden, bis eine deutlich erkennbare Farbumschlaggrenze erreicht wird.

## 2.5 Wartezeit

Nach dem Ansprühen werden die Prüfkörper bis zur Messung in der Regel 24 Stunden an Raumluft gelagert, da sich die Farbumschlaggrenze in Abhängigkeit vom Feuchtigkeitsgehalt des Prüfkörpers in Richtung auf größere Carbonatisierungstiefen verschieben kann [11, 12]. Kürzere Wartezeiten sind bei trockenen Betonprobekörpern möglich, wenn man nachweisen kann, daß keine Veränderung der Carbonatisierungsfront gegenüber einer Wartezeit von 24 Stunden auftritt.

## 2.6 Bestimmung der Meßlänge

Bei Probekörpern, bei denen mehrere Außenseiten des Bruchquerschnittes carbonatisieren können, treten Eckbereiche auf, in denen sich der Einfluß der beiden Carbonatisierungsfronten überlagert. Der nichtcarbonatisierte Bereich weist hier eine Ausrundung auf, die bei der Berechnung des Mittelwertes nicht berücksichtigt werden soll (Bild 2).

Die Eckbereiche liegen dabei im Bereich der Summe der beiden Carbonatisierungstiefen der angrenzenden Seiten, somit ergibt sich die unbeeinflusste Meßlänge zu  $l_m < a - 2d_k^0 - d_{k1}^0 - d_{k2}^0$  (Bild 2).

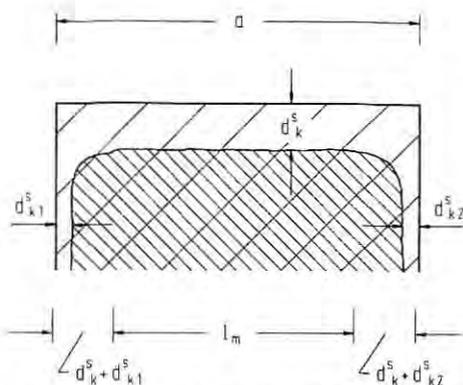


Bild 2 Berücksichtigung des Eckenflusses mit Hilfe geschätzter Carbonatisierungstiefen  $d_k^s$

Sind die Carbonatisierungstiefen der drei Seiten etwa gleich, so ergibt sich die Meßlänge zu  $l_m < a - 4d_k^s$ .

Die Messung der Carbonatisierungstiefe ist nur sinnvoll, bis die rechnerische Meßlänge gegen Null geht, d. h. für quadratische Probekörper ist die Carbonatisierungstiefe nur bestimmbar bis

$d_k \leq 25,0$  mm für Probekörperabmessung  $a = 10$  cm,

$d_k \leq 37,5$  mm für Probekörperabmessung  $a = 15$  cm und

$d_k \leq 50,0$  mm für Probekörperabmessung  $a = 20$  cm.

## 2.7 Festlegung der Carbonatisierungsfront

### 2.7.1 Allgemeines

Die Carbonatisierungsfront wird anhand der Farbumschlaggrenze, die durch Verbindungslinien gemäß Abschnitten 2.7.2 und 2.7.3 ergänzt wurde, festgelegt. Hierbei werden drei Grundfälle unterschieden (Bild 3): a steht für eine fast geradlinige Carbonatisierungsfront, b für eine Carbonatisierungsfront, die um einen Mittelwert leicht schwankt und c für eine Carbonatisierungsfront mit einzelnen auffälligen Extremwerten. Grundsätzlich sollte je Seite neben der mittleren Carbonatisierungstiefe auch der jeweils größte Einzelwert der Carbonatisierungstiefe angegeben werden und gleichzeitig eine Zuordnung zu den Fällen a, b oder c erfolgen.

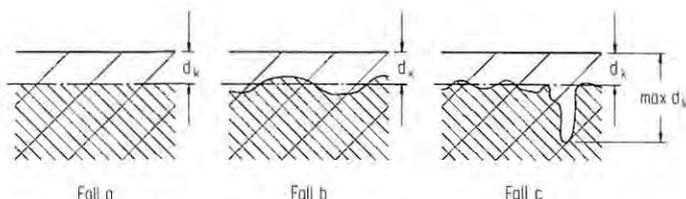


Bild 3 Unterscheidung der Carbonatisierungsfront in drei Fälle

### 2.7.2 Beurteilung dichter Zuschläge

Dichte Zuschläge, die im Bereich der Carbonatisierungsfront liegen, werden durch die Phenolphthaleinlösung nicht angefärbt. Die Carbonatisierungsfront wird durch derartige Zuschläge „unterbrochen“ (Bild 4, links). Für die Bestimmung der Carbonatisierungstiefe ist die theoretische Carbonatisierungsfront über das jeweilige Zuschlagkorn mittels eines schwarzen Farbstiftes zu ergänzen (Ränder verbinden, wie in Bild 4, rechts).

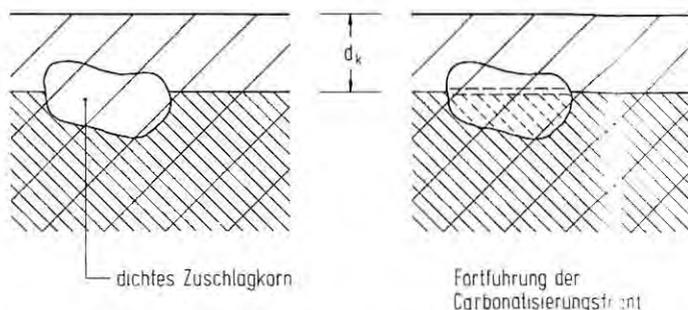


Bild 4 Fortführung der Carbonatisierungsfront über dichte Zuschläge hinweg

### 2.7.3 Beurteilung von Poren und porösen Zuschlägen

Liegen Poren oder poröse Zuschläge (oder Risse) im Bereich der Carbonatisierungsfront, können in diesem Bereich auffällige Extremwerte der Carbonatisierungstiefe auftreten. Sind die auftretenden Abweichungen  $\Delta d_k$  (Bild 5) eines derartigen Einzelwertes vom geschätzten Mittelwert der Carbonatisierungstiefe klein, d. h. für Beton  $\leq 4$  mm und für Mörtel  $\leq 1,5$  mm, so sind die gefundenen Einzelwerte mit in den Mittelwert einzubeziehen (Fall b). Treten jedoch größere Abweichungen vom Mittelwert auf, so sind derartige Einzelwerte als „Ausreißer“ zu betrachten, d. h. sie werden bei der Mittelwertbildung nicht berücksichtigt; es ist wie unter Abschnitt 2.7.2 vorzugehen, jedoch wird der jeweilige Einzelwert als  $\max d_k$  zusätzlich angegeben (Fall c). Treten je Prüfseite mehrere derartige Einzelwerte auf, so ist die Anzahl der „größeren Abweichungen“ im Meßprotokoll festzuhalten und der größte Einzelwert anzugeben.

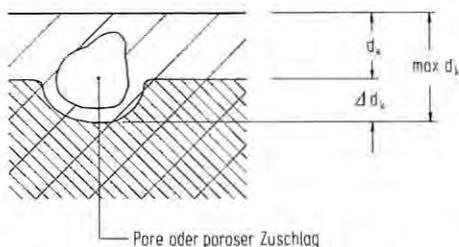


Bild 5 Kriterium für die Zuordnung von Carbonatisierungsspitzen zu den Fällen b oder c nach Bild 3

Der Mittelwert verliert mit zunehmender Anzahl derartiger „Ausreißer“ an Bedeutung.

## 2.8 Messung der Carbonatisierungstiefe

Als mittlere Carbonatisierungstiefe wird innerhalb der festgelegten Meßlänge der mittlere senkrechte Abstand aller Punkte auf der Farbumschlaggrenze zur zugehörigen Prüfkörperoberfläche definiert. Für die Messung stehen die Verfahren 2.8.1 und 2.8.2 alternativ zur Verfügung, die bei Vergleichsversuchen gleiche mittlere Carbonatisierungstiefen ergaben. Bei der Aufzeichnung der Meßergebnisse ist zusätzlich zu vermerken, ob es sich um Betonieroberseiten, Seitenflächen oder Unterseiten handelt.

### 2.8.1 Methode der Einzelwertmessung

Die Anzahl  $n$  der zu bestimmenden Einzelwerte je Probekörperseite wird durch die nach Abschnitt 2.6 ermittelte Meßlänge bestimmt (Tafel 1).

Tafel 1 Anzahl der Meßstellen für die „Einzelwertmethode“ in Abhängigkeit von der Meßlänge

Meßlänge ( $l_m$ ) in mm	$\leq 40$	$\leq 100$	$\leq 150$	$> 150$
Mindestanzahl der Meßstellen	3	5	8	10

Die Meßlänge ist in gleiche Abstände  $d_i = l_m / (n - 1)$  einzuteilen. Für diese Stellen sind mittels Maßstab, Schieblehre oder Tiefenmeßlehre die einzelnen Werte ( $d_{ki}$ ) auf 0,5 mm genau zu ermitteln (Bild 6). Dabei ist darauf zu achten, daß der senkrechte Abstand, bezogen auf die zugehörige Seitenfläche, für die die Carbonatisierungstiefe bestimmt werden soll, gemessen wird. Zur Vermeidung von Meßfehlern hat sich ein Anschlagwinkel oder die Verwendung einer Tiefenmeßlehre bewährt. Die mittlere Carbonatisierungstiefe ergibt sich als arithmetisches Mittel der  $n$  Einzelwerte und ist auf 0,5 mm gerundet anzugeben.

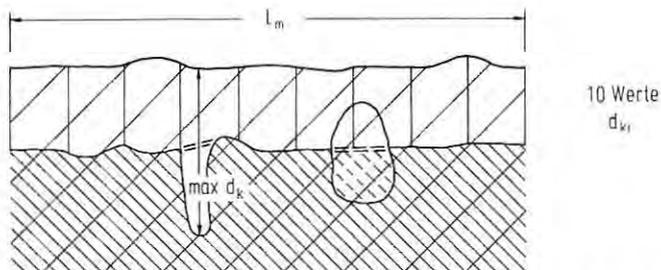


Bild 6 Bestimmung der Carbonatisierungstiefe mit der Einzelwertmethode

## 2.8.2 Methode der augenscheinlichen Integralbildung

Bei dieser Methode wird die „gezackte“ Farbumschlaggrenze, einschließlich der Verbindungslinien, durch eine gerade Meßlinie angenähert. Die Meßgerade wird parallel zur Seite, für die die Carbonatisierungstiefe bestimmt werden soll, so lange verschoben, bis nach Augenschein ein Flächenausgleich der auf jeder Seite der Meßlinie überstehenden Bereiche der Carbonatisierungsgrenze erreicht wird (Bild 7). Hierfür hat sich das im Forschungsinstitut entwickelte, einer Schieblehre ähnliche Gerät bewährt (Bild 8). Es ver-

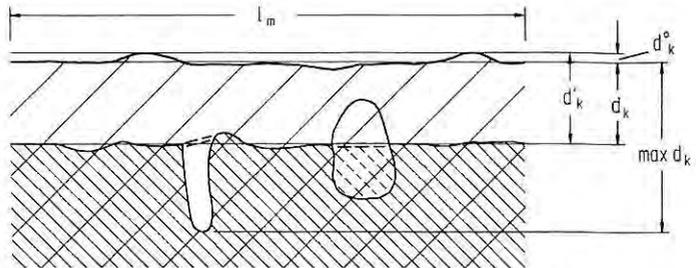


Bild 7 Bestimmung der Carbonatisierungstiefe mit der Integralmethode (Flächenausgleich nach Augenschein)

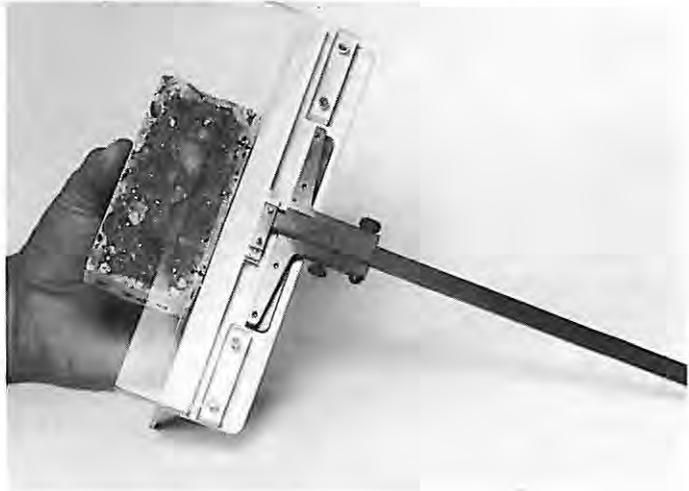


Bild 8 Meßschieblehre für die einfache Durchführung der Integralmethode

fügt über einen Anschlagwinkel, so daß die Meßlinie stets senkrecht zur äußeren Oberfläche verschoben wird. Die auf beiden Seiten der 10 mm dicken Plexiglasscheibe übereinander eingeritzten Meßlinien erlauben eine parallaxenfreie Messung der mittleren Carbonatisierungstiefe über eine Meßlänge bis zu 20 cm. Auch Einzelwerte, z. B. Maximalwerte, lassen sich mit dem Gerät einfach und zuverlässig messen. Bei rauher Außenfläche (rauhem Anschlagseite des Pro-

bekörpers) ist zusätzlich eine Nullstellung, d. h. ein Meßwert für den mittleren Probekörpererrand ( $d_k^0$ ) zu ermitteln (Bild 7). Die mittlere Carbonatisierungstiefe ist als Differenz  $d_k^* - d_k^0$  zu bestimmen.

## 2.9 Ablaufdiagramm

Eine Übersicht über die beschriebenen Schritte zur Bestimmung der Carbonatisierungstiefe enthält das Ablaufdiagramm auf Bild 9.

## 3. Meßprotokoll

Über die Durchführung der Carbonatisierungsmessung ist ein Meßprotokoll anzufertigen. Bild 10 zeigt ein Muster des hierfür im Forschungsinstitut der Zementindustrie verwendeten Ergebnisformblattes, das den Prüfer durch entsprechende Ja/Nein-Eintragungen auch zur Beachtung solcher Vorgänge anleitet, bei denen keine Meßwerte anfallen.\*)

## 4. Zusammenfassung

4.1 Sachgerecht zusammengesetzter, hergestellter und nachbehandelter Beton schützt den mit ausreichender Betondeckung eingelegten Bewehrungsstahl dauerhaft vor Korrosion. Die Ermittlung der Carbonatisierungstiefe dient vor allem zur Beurteilung, ob die Porenlösung in der Umgebung des Bewehrungsstahls ausreichend alkalisch ist, um die korrosionsschützende Passivschicht weiterhin stabil zu halten.

4.2 Der carbonatisierte Bereich kann an frischen Bruchflächen senkrecht zur Betonoberfläche aufgrund der vorhandenen pH-Wert-Änderung durch Ansprühen mit geeigneten Indikatorlösungen sichtbar gemacht werden. Für die Bestimmung der Carbonatisierungstiefe mittels Phenolphthaleinlösung liegen zahlreiche Literaturangaben, insbesondere die RILEM-Empfehlung CPC-18 [12], vor. Die dort beschriebenen Verfahren gewähren z. T. einen relativ großen subjektiven Spielraum bei der Beurteilung der Carbonatisierungstiefe, was zu unterschiedlichen Meßergebnissen führen kann.

4.3 Die maßgebenden Verfahrensschritte wie Gewinnung bzw. Herstellung der Probekörper, Herstellung der frischen Bruchflächen, Art und Aufbringen der Phenolphthaleinlösung sowie Wartezeit und Beurteilung der Carbonatisierungstiefe wurden zusammengestellt und ein einheitliches Vorgehen vorgeschlagen. Neu sind insbesondere die Wertung der carbonatisierten Eckbereiche an Probekörpern, die Fortführung der Carbonatisierungsfront über die Zuschläge sowie die Behandlung von Poren oder porösen Zuschlägen innerhalb der Carbonatisierungsfront.

4.4 Für die Bestimmung der mittleren Carbonatisierungstiefe werden die Verfahren Einzelwertmessung (mit festgelegter Anzahl an

---

\*) Dieses Ergebnisformblatt liegt im Forschungsinstitut der Zementindustrie im Format DIN A4 vor und kann Interessenten einzeln zugeschickt werden.

Meßpunkten) und das Verfahren des augenscheinlichen Integralausgleichs (mit der neu entwickelten Meßschieblehre) vorgestellt. Beide Verfahren erwiesen sich als aussagekräftig, einfach durchführbar und gut reproduzierbar.

4.5 Zur Schulung und zur konsequenten Durchführung aller zu beachtenden Einzelschritte der Bestimmung der Carbonisierungstiefe dienen ein Ablaufdiagramm und ein Ergebnisformblatt.

#### SCHRIFTTUM

- [1] Locher, F. W.: Zement. Ullmanns Encyclopädie der technischen Chemie. Band 24, 4. Auflage, S. 545/574. Verlag Chemie Weinheim 1983.
- [2] VDZ-Kommission „Carbonatisierung“: Carbonatisierung des Betons. beton 22 (1972) H. 7, S. 296/299; ebenso Betontechnische Berichte 1972, Beton-Verlag, Düsseldorf 1973, S. 125/133.
- [3] Wischers, G.: Langzeitverhalten von Betonbauwerken. Betonwerk + Fertigteil-Technik 50 (1984) H. 8, S. 589/592.
- [4] Manns, W., und O. Schatz: Über die Beeinflussung der Festigkeit von Zementmörteln durch Karbonatisierung. Betonstein-Zeitung 33 (1967) H. 4, S. 148/156.
- [5] Kropp, J., und H. K. Hilsdorf: Beeinflussung der Zementsteinstruktur und des Wassertransportes durch die Carbonatisierung. Int. Kolloquium Werkstoffwissenschaften und Bausanierung, 6.-8. Sept. 1983, Techn. Akademie Esslingen, Edition Lack und Chemie 1983, Elvira Moeller, Filderstadt 4, S. 153/157.
- [6] Powers, T. C.: A Hypothesis on Carbonation Shrinkage. Journal of the Portland Cement Association 4 (1982) Nr. 2, S. 40/50.
- [7] Grube, H.: Oberflächenqualität des Betons – Beeinflussung durch Schwinden und Schrumpfen. Bericht über einen Vortrag auf der VDZ-Tagung 1983. beton 33 (1983) H. 12, S. 479.
- [8] Deutscher Ausschuß für Stahlbeton, H. 170. Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin 1965.
- [9] Deutscher Ausschuß für Stahlbeton, H. 182. Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin 1967.
- [10] Richtlinie für die Erteilung von Prüfzeichen für Steinkohlenflugasche als Betonzusatzstoff nach DIN 1045 (Prüfzeichenrichtlinie), Fassung Sept. 1979. Mitteilungen des Instituts für Bautechnik 2/1980, S. 39/43.
- [11] Schießl, P.: Zur Frage der zulässigen Rißbreite und der erforderlichen Betondeckung im Stahlbetonbau unter besonderer Berücksichtigung der Carbonatisierung des Betons. Deutscher Ausschuß für Stahlbeton, H. 255. Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin 1976.
- [12] RILEM Draft Recommendation CPC-18. Measurement of hardened concrete carbonation depth. Matériaux et Constructions 17 (1984) No. 102, S. 435/440.

Bestimmung der Carbonatisierungstiefe  
- Ablaufdiagramm -

- Probekörper: spalten  
Bruchfläche reinigen und mit  
1 % Phenolphthaleinlösung in 70 Vol.-% Alkohol besprühen  
24 Stunden trocknen lassen
- Carbonatisierungstiefe schätzen:  $d_k^s$
- Meßlänge ermitteln:  $l_m \leq a - 2 d_k^s - d_{kl}^s - d_{k2}^s$

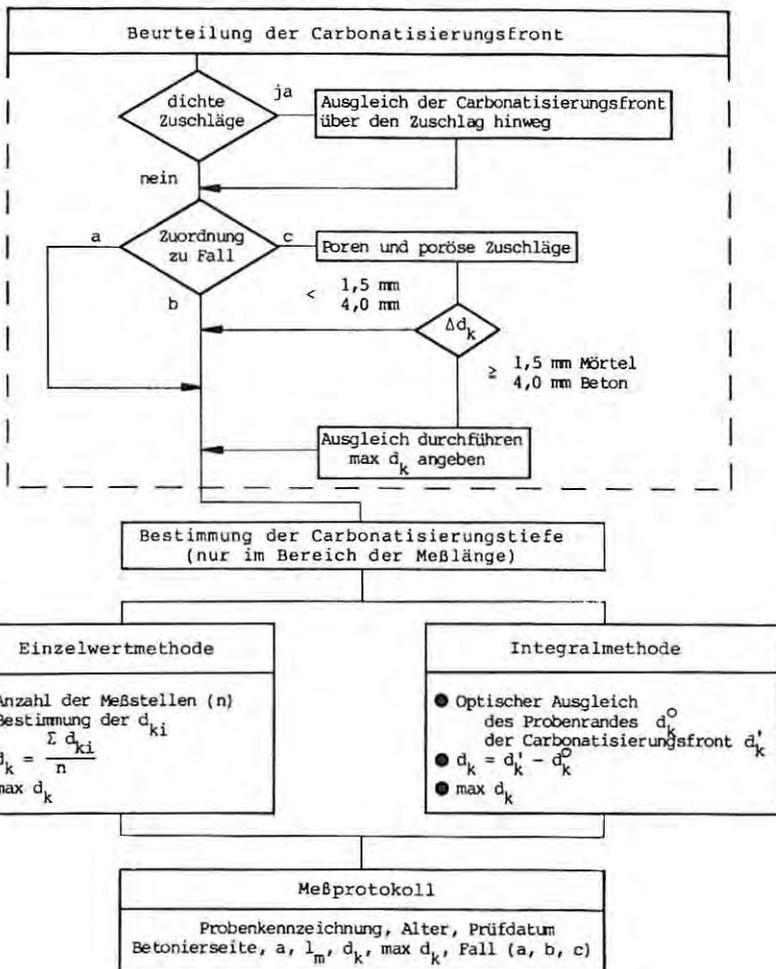


Bild 9 Ablaufdiagramm zur Bestimmung der Carbonatisierungstiefe

**Bestimmung der Carbonatisierungstiefe**  
- Ergebnisformblatt -

Prüfstelle: \_\_\_\_\_

Probekörperbezeichnung: \_\_\_\_\_

Laborherstellung                       Baustellenentnahme                      Herstell-/Entnahmedatum: \_\_\_\_\_

Zementgehalt: \_\_\_\_\_ Baustelle : \_\_\_\_\_

w/z-Wert : \_\_\_\_\_ Bauteil : \_\_\_\_\_

Betonkennzeichnung: \_\_\_\_\_

● Probekörperabmessungen: \_\_\_\_\_

● Lagerung der Proben: \_\_\_\_\_  
(Dauer, Temperatur °C, rel. Luftfeuchte %)

● Bruchflächen durch  Spaltzug  Abschlagen erzeugt                      Datum: \_\_\_\_\_ Uhrzeit: \_\_\_\_\_

● und sogleich angesprüht mit 1 Vol.-% Phenolphthaleinlösung in 70 Vol.-% Alkohol

● Probenalter in Tagen: \_\_\_\_\_  
(zum Zeitpunkt der Herstellung der Bruchflächen und des Ansprühens)

● 24 Stunden gewartet                       ja                       nein

● Ausgleich der Carbonatisierungsfront über dichte Zuschläge                       ja                       nein

● Messung der Carbonatisierungstiefe (alternativ Einzelwert- oder Integralmethode)

Einzelwertmethode

Carbonatisierungstiefe auf 0,5 mm gerundet											Mittelwert $\bar{d}_k$	max $d_k$	Fall a, b, c	Anzahl der Einzelwerte				
Seite	Meßlänge $l_m$ mm	Meßstelle																
	$l_m > 150$ mm																	
	$l_m \leq 150$ mm																	
	$l_m \leq 100$ mm																	
	$l_m \leq 40$ mm																	
Herstelloberseite																		
Seite 1																		
Herstellunterseite																		
Seite 2																		

Integralmethode (FIZ-Meßlehre)

Seite	Carbonatis.-Front $d'_k$	Nullpunkt $d_k^0$	mittl. Carbo- natis.-Tiefe $d_k = d'_k - d_k^0$	größter Einzelwert max $d_k$	Fall a, b, c	Anzahl der Einzelwerte
Herstelloberseite						
Seite 1						
Herstellunterseite						
Seite 2						

● Gesamtergebnis

Gesamtmittel aller Seiten: \_\_\_\_\_ Größter Einzelwert: \_\_\_\_\_ Fall  a  b  c

(Ort)

(Datum)

(Unterschrift)

Bild 10 Formblatt zur Aufzeichnung der Meßergebnisse