

# Die Beständigkeit von Beton gegenüber kalklösender Kohlensäure \*)

Von F. W. Locher und S. Sprung, Düsseldorf

## Übersicht

Nach DIN 4030 gilt Wasser mit einem Gehalt an kalklösender Kohlensäure von über 60 mg  $\text{CO}_2/\text{l}$  als „sehr stark betonangreifend“. Beton muß dann nach DIN 1045 vor dem unmittelbaren Zutritt dieses Wassers geschützt werden. Da die Grenzwerte zur Beurteilung der angreifenden Wirkung aufgrund älterer Erfahrungen und Untersuchungen festgelegt wurden und daher möglicherweise unangemessen weit auf der sicheren Seite liegen, wurden Versuche durchgeführt, bei denen Prismen aus Zementmörtel mit verschiedener Zusammensetzung in Wasser mit mehr als 100 mg kalklösender Kohlensäure je Liter lagerten. Nach einer Lagerungsdauer von 11 Jahren ergab sich, daß bei dichtem Mörtel mit Quarzgestein als Zuschlag nur die oberflächennahen Bereiche bis etwa 2,5 mm Dicke ausgelaugt und abgetragen wurden. Maßgebend für den Widerstand war in erster Linie die Dichtigkeit; der Einfluß der Zementart hatte eine geringere Bedeutung. Mörtel mit Kalkstein als Zuschlag wurde wesentlich stärker angegriffen. Als Folgerung ergab sich, daß dichter Beton ohne zusätzlichen Schutz dem Angriff von Wässern mit Gehalten an kalklösender Kohlensäure auch von über 60 bis etwa 100 mg  $\text{CO}_2/\text{l}$  in ausreichendem Maß widerstehen kann.

## 1. Einleitung

Wasser mit kalklösender Kohlensäure greift Beton durch Herauslösen der Calciumverbindungen an. Nach DIN 4030 „Beurteilung betonangreifender Wässer, Böden und Gase“ (Ausgabe November 1969) gilt Wasser mit einem Gehalt an kalklösender Kohlensäure zwischen 15 und 30 mg  $\text{CO}_2/\text{l}$  als „schwach angreifend“, zwischen 30 und 60 mg  $\text{CO}_2/\text{l}$  als „stark angreifend“ und über 60 mg  $\text{CO}_2/\text{l}$  als „sehr stark angreifend“. Während bei schwachem und starkem Angriff die DIN 1045 „Beton- und Stahlbetonbau; Bemessung und Ausführung“ (Ausgabe Januar 1972) die Herstellung von Beton mit einer entsprechend abgestuften Dichtigkeit vorschreibt, muß

\*) Auszug aus dem Vortrag von S. Sprung und W. Rechenberg über „Die Beständigkeit von Beton gegen chemischen Angriff“ auf der Technisch-wissenschaftlichen Herbsttagung 1974 des Vereins Deutscher Zementwerke in Hamburg.

bei sehr starkem Angriff der Beton vor dem unmittelbaren Zutritt des Wassers geschützt werden.

Die Grenzwerte zur Beurteilung des chemischen Angriffs durch kalklösende Kohlensäure beruhen auf praktischen Erfahrungen und auf den Ergebnissen von älteren Lagerungsuntersuchungen in natürlichen Wässern und im Laboratorium, u. a. von R. Grün und K. Obenauer [1] sowie von G. Mall [2]. Dabei war zu berücksichtigen, daß häufig die Angaben über die Zusammensetzung des angreifenden Wassers nicht vollständig waren, extreme Lagerungsbedingungen gewählt worden waren oder daß die Betone in ihrer Zusammensetzung und in ihren Eigenschaften nicht den Anforderungen entsprachen, die heute nach DIN 1045, Abschnitt 6.5.7.4 „Beton mit hohem Widerstand gegen chemische Angriffe“, gestellt werden. Es war daher erforderlich, in der DIN 4030 die Grenzwerte für die Beurteilung des chemischen Angriffs durch kalklösende Kohlensäure so niedrig festzulegen, daß sie in jedem Fall, möglicherweise aber auch übermäßig weit, auf der sicheren Seite liegen.

Das hat zur Folge, daß in verschiedenen Bereichen der Bundesrepublik, in denen Grundwässer mit Gehalten an kalklösender Kohlensäure zwischen etwa 50 und 80 mg  $\text{CO}_2/\text{l}$  vorkommen, der Beton vor dem Zutritt des Wassers geschützt werden muß. Diese Forderung verlangt einen zusätzlichen Aufwand oder kann, wie z. B. bei Pfahlgründungen, kaum erfüllt werden. Es war daher zu prüfen, ob diese Maßnahme zwingend erforderlich ist oder ob in solchen Fällen auch ein ungeschützter Beton mit entsprechender Dichtigkeit ausreichend widerstandsfähig ist. Aus diesem Grund werden im Forschungsinstitut der Zementindustrie seit 1963 Lagerungsversuche durchgeführt, um das Verhalten von Beton mit verschiedener Zusammensetzung in Wasser mit einem Gehalt an kalklösender Kohlensäure von mehr als 60 mg  $\text{CO}_2/\text{l}$  zu prüfen.

In diesem Zusammenhang sollte auch die Frage geklärt werden, ob durch Verwendung von Kalkstein als Betonzuschlag die Widerstandsfähigkeit des Betons gegenüber dem Angriff von kalklösender Kohlensäure erhöht werden kann. Im Schrifttum werden darüber verschiedene Meinungen vertreten. Während u. a. O. Graf und H. Goebel [3] die Verwendung nichtsäurelöslicher Zuschläge für Betone empfehlen, die einem Säureangriff ausgesetzt sind, soll nach N. Stutterheim und J. H. P. van Aardt [4, 5] Kalksteinzuschlag die Widerstandsfähigkeit verbessern. Nach Darstellung von F. Gille [6] muß bei der Beurteilung der Wirksamkeit von Kalkstein vor allem dessen unterschiedlich große, von seiner Porosität abhängige Lösungsgeschwindigkeit beachtet werden, die häufig – vor allem jedoch in ständig erneuertem Wasser – größer ist als die des dichten Zementsteins.

## **2. Wirkungsweise der kalklösenden Kohlensäure**

Gasförmiges Kohlendioxid  $\text{CO}_2$  kann sich im Wasser lösen, und zwar um so mehr, je niedriger die Temperatur und je höher der Druck ist. Die Löslichkeit bei normalem Druck beträgt z. B. bei 20 °C etwa 1700 mg  $\text{CO}_2/\text{l}$  und bei 10 °C etwa 2300 mg  $\text{CO}_2/\text{l}$ . Ein Teil des in Wasser gelösten Kohlendioxids bildet Kohlensäure

$H_2CO_3$ , die mit den Calciumverbindungen des Zementsteins reagieren kann. Dabei entsteht zunächst Calciumcarbonat  $CaCO_3$ , das sich mit weiterer Kohlensäure unter Bildung des löslichen Calciumhydrogencarbonats  $Ca(HCO_3)_2$  wieder umsetzt. Auf diese Weise wird Kalk aus dem Beton herausgelöst.

Calciumhydrogencarbonat ist in praktisch allen natürlichen Wässern enthalten. Zusammen mit Magnesiumhydrogencarbonat ist es die Ursache der Carbonathärte. Es ist nur in gelöster Form beständig. Beim Eindampfen von Wasser mit Calciumhydrogencarbonat bildet sich daher festes Calciumcarbonat, dabei entweicht ein Teil des ursprünglich im Calciumhydrogencarbonat gebundenen Kohlendioxids. Aus diesem Grund wird der Kohlendioxidanteil des Calciumhydrogencarbonats als „halbgebundene Kohlensäure“ und der des Calciumcarbonats, wie z. B. im Kalkstein, als „gebundene Kohlensäure“ bezeichnet. Kohlendioxid, das über die halbgebundene Kohlensäure hinaus im Wasser enthalten ist, wird „freie Kohlensäure“ genannt.

Ein bestimmter Anteil an freier Kohlensäure ist erforderlich, um das Calciumhydrogencarbonat in Lösung zu halten; er wird als „zugehörige Kohlensäure“ bezeichnet und wirkt nicht kalklösend. Die freie Kohlensäure besteht demnach aus der „zugehörigen Kohlensäure“ und der „überschüssigen Kohlensäure“. Von der überschüssigen Kohlensäure kann jedoch auch nur ein bestimmter Anteil kalklösend wirken, die sogenannte „kalklösende Kohlensäure“. Das Calciumhydrogencarbonat, das beim Angriff der kalklösenden Kohlensäure in Lösung geht, beansprucht nämlich auch wieder einen entsprechenden Anteil an zugehöriger Kohlensäure; daher ist der Anteil an kalklösender Kohlensäure stets kleiner als der Gehalt an überschüssiger Kohlensäure.

Die Konzentration an kalklösender Kohlensäure wird nach DIN 4030 mit dem Marmorversuch nach Heyer bestimmt [7]. Nach J. Tillmanns ist es jedoch auch möglich, sie aus der Carbonathärte und dem Gehalt an freier Kohlensäure anhand des Kalk-Kohlensäure-Gleichgewichts zu berechnen.

### 3. Versuchsdurchführung

#### 3.1. Zemente

Für die Untersuchungen wurden 3 Portlandzemente Z 275, 4 Hochofenzemente Z 275, 1 Traßzement Z 275 und 1 Traßhochofenzement Z 275 verwendet. Die Zusammensetzung der Zemente geht aus Tafel 1 hervor. Die Portlandzemente 1, 2 und 3 wurden nach ihrem rechnerischen Gehalt an Tricalciumaluminat ( $C_3A$ ) ausgewählt, der zwischen 0 und 11 Gew.-% lag. Sie unterschieden sich außerdem deutlich im Gehalt an Tricalciumsilicat, der beim  $C_3A$ -freien Zement 3 mit 42 Gew.-% am niedrigsten war. Der Zement 2 mit dem höchsten Gehalt an Tricalciumsilicat von 64 Gew.-% wies zugleich den niedrigsten Gehalt an  $C_3A + C_4AF$  auf. Die 4 Hochofenzemente 4, 5, 6 und 7 enthielten 47 bis 74 Gew.-% Hüttensand unterschiedlicher Zusammensetzung. Der Traßgehalt des Traßzements 8 lag im üblichen Bereich, der Traß-

Tafel 1 Zusammensetzung der Zemente

Zement	Klinkerphasen nach Bogue in Gew.-%				Hütten- sand- gehalt in Gew.-%	Traß- gehalt in Gew.-%
	C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> AF		
1 PZ 275	55	13	11	11		
2 PZ 275	64	12	9	5		
3 PZ 275	42	31	0	20		
4 HOZ 275					47	
5 HOZ 275					57	
6 HOZ 275					62	
7 HOZ 275					74	
8 TrZ 275						30
9 Tr-HOZ 275					~ 25	~ 15

hochofenzement 9 wies einen hohen Gehalt an Hüttenessand und Traß und dementsprechend einen verhältnismäßig niedrigen Klinkergehalt auf.

### 3.2. Zusammensetzung und Vorlagerung des Betons

Die Untersuchungen wurden mit Mörtelprismen der Abmessungen 4 cm x 4 cm x 16 cm ausgeführt. Es wurden 4 verschiedene Mörtel A, B, C und D hergestellt, deren Zusammensetzung aus Tafel 2 hervorgeht. Die Mörtel A, B und D waren nahezu erdfeucht, Mörtel C erschien plastisch-weich. Alle Mörtel ließen sich in den Formen praktisch vollständig verdichten. In die Versuchsreihe A wurden alle neun Zemente einbezogen und in die drei Versuchsreihen B, C und D nur der Portlandzement 1 mit mittlerem Tricalciumsilicatgehalt und zwei Hochofenzemente 4 und 7 mit dem niedrigsten und dem höchsten Hüttenessandgehalt. Die Versuchsreihe A sollte Aufschluß über das Verhalten der verschiedenen Zemente geben. Mit den Versuchsreihen B und C sollte geklärt werden, in welchem Maß sich eine Erhöhung der Menge und der Dichtigkeit des Zementsteins auf die Widerstandsfähigkeit des Mörtels gegenüber kalklösender Kohlensäure auswirkt. In der Versuchsreihe B wurde daher bei gleichem Wasserzementwert von 0,50 wie in der Versuchsreihe A der

Tafel 2 Zusammensetzung des Mörtels

Versuchsreihe	A	B	C	D
Zementgehalt in kg/m <sup>3</sup>	375	500	350	375
Wasserzementwert	0,50	0,50	0,70	0,50
Zuschlag 1/7 mm	Quarz	Quarz	Quarz	Kalkstein
Zemente (Tafel 1)	1 bis 9	1, 4, 7	1, 4, 7	1, 4, 7

Zementgehalt von 375 auf 500 kg/m<sup>3</sup> erhöht. In der Versuchsreihe C wurde bei einem Zementgehalt von 350 kg/m<sup>3</sup> ein Wasserzementwert von 0,70 gewählt. Die Versuchsreihe D sollte Aufschluß darüber geben, ob sich bei sonst gleicher Mörtelzusammensetzung wie in der Versuchsreihe A durch Verwendung von Kalkstein als Zuschlag anstelle von Quarz die Widerstandsfähigkeit gegenüber Säureangriffen ändert.

Als Zuschlag bis 1 mm wurden Quarzmehl 0/0,2 mm und Quarzsand 0/1 mm verwendet und für den Anteil 1/7 mm Rheinsand oder Kalksteinbrechsand aus einem devonischen, dichten Massenkalk. Das Zuschlaggemisch wurde aus den vier Kornfraktionen 0/0,2 mm, 0/1 mm, 1/3 mm und 3/7 mm so zusammengesetzt, daß seine Sieblinie etwa in der Mitte des „besonders guten“ Bereichs zwischen den Grenzsieblinien A und B des Bildes 1 der DIN 1045 (alte Fassung November 1959) verlief.

Aus jedem Mörtel wurden 6 Prismen (4 cm x 4 cm x 16 cm) hergestellt, insgesamt 108 Prismen. Die Prismen wurden nach einem Tag Feuchtlagerung entformt, lagerten bis zum Alter von sieben Tagen in Wasser, dann bis zum Alter von 28 Tagen unter feuchten Tüchern und wurden anschließend dem Angriff des Wassers mit der kalklösenden Kohlensäure ausgesetzt.

### 3.3. Lagerung in Wasser mit kalklösender Kohlensäure

Um alle Mörtel den gleichen Angriffsbedingungen auszusetzen, wurden die 108 Prismen gemeinsam in einem Lagerungsbehälter aus PVC mit einem Volumen von rd. 165 l gelagert. Der Lagerungsbehälter war mit vollentsalztem Wasser gefüllt, das ständig mit Kohlendioxid gesättigt war. Den Aufbau der Lagerungseinrichtung gibt Bild 1 wieder.

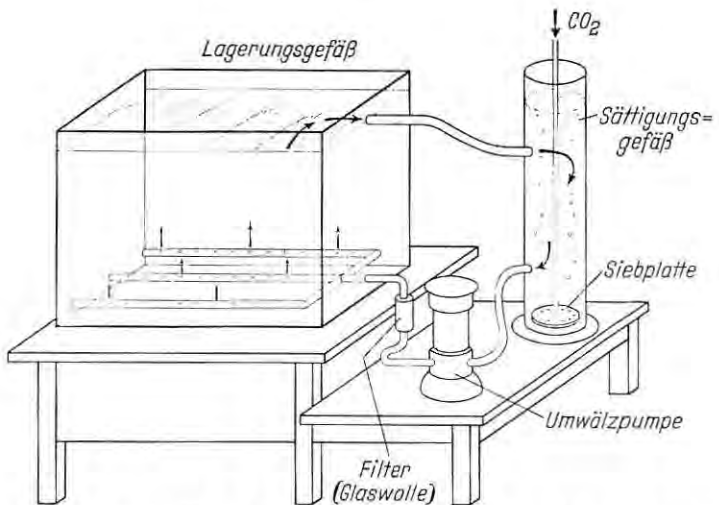


Bild 1 Einrichtung für die Lagerung der Prüfkörper aus Feinbeton in Wasser mit ständig erneuertem Gehalt an kalklösender Kohlensäure

In einem zylindrischen Sättigungsgefäß wurde ständig Kohlendioxid in das Wasser eingeleitet. Das auf diese Weise mit Kohlendioxid gesättigte Wasser wurde über ein Glaswolle-Filter durch die Bohrungen einer Rohrleitung in den Lagerungsbehälter gepumpt, in dem die Mörtelprismen in drei Schichten auf PVC-Leisten lagerten. Durch einen Überlauf floß das Wasser in das Sättigungsgefäß zurück. Die Wassertemperatur betrug im Mittel 20 °C.

Der Gehalt an kalklösender Kohlensäure stieg zu Beginn der Lagerung innerhalb von 8 h häufig auf Werte über 250 mg CO<sub>2</sub>/l an. Dabei ging Kalk aus der Oberfläche der Prismen als Calciumhydrogencarbonat in Lösung. Infolgedessen stieg der Gehalt an Calciumhydrogencarbonat in der Lösung an und entsprechend auch der Gehalt an zugehöriger Kohlensäure, die erforderlich ist, um das Calciumhydrogencarbonat in Lösung zu halten. Mit fortschreitendem Angriff auf den Mörtel nahm daher der Gehalt an kalklösender Kohlensäure im Wasser wieder ab. Aus diesem Grund wurde der Gehalt an kalklösender Kohlensäure ständig überprüft und das Wasser gewechselt, wenn deren Gehalt auf Werte zwischen etwa 40 und 100 mg CO<sub>2</sub>/l abgesunken war. Mit abnehmendem Gehalt an kalklösender Kohlensäure und dementsprechend zunehmendem Gehalt an Calciumhydrogencarbonat stieg der pH-Wert von etwa 5,6 bis 5,8 — gemessen 8 h nach dem Wasserwechsel — auf Werte von 6,2 bis 6,8 — gemessen unmittelbar vor dem Wasserwechsel.

Zu Beginn der Einlagerung nahm der Gehalt an kalklösender Kohlensäure schnell ab, da aus den frischen Mörteloberflächen der Kalk verhältnismäßig schnell herausgelöst wurde. Aus diesem Grund mußte anfangs das Wasser in Abständen von etwa fünf Tagen erneuert werden. Später nahm die Lösungsgeschwindigkeit des Kalks deutlich ab, so daß dann ein Wasserwechsel im zeitlichen Abstand von drei bis vier Wochen ausreichte.

Nach jeweils drei Monaten Lagerung wurden die Prismen mit einem feuchten Tuch vorsichtig abgetrocknet und gewogen. Als Maß für die Wirkung der kalklösenden Kohlensäure wurde der Gewichtsverlust, bezogen auf das Gewicht nach der Wasserlagerung im Alter von sieben Tagen, herangezogen; daraus wurde anhand der Betonrohddichte die Volumenverminderung sowie die Dicke der abgelösten Schicht errechnet.

## **4. Versuchsergebnisse**

### **4.1. Sichtbare Veränderungen**

Nach elfjähriger Lagerung in Wasser mit Gehalten an kalklösender Kohlensäure von im Mittel mehr als 100 mg/l zeigten sich deutliche Unterschiede im Aussehen der Prismen, wie aus den Bildern 2 bis 5 hervorgeht. Bei allen Prismen war unabhängig von Zementart, Zementgehalt, Wasserzementwert und Zuschlagart deutlich die Wirkung des lösenden Angriffs festzustellen, die sich in einer mehr oder weniger tiefen Aufräumung der Oberfläche und im fortgeschrittenen Stadium auch durch Abrundungen an den Ecken und Kanten der Prismen bemerkbar machte.

Die Prismen aus Mörtel mit Quarzgestein als Zuschlag sind in den Bildern 2, 3 und 4 wiedergegeben. Der Mörtel dieser Prismen unterschied sich durch die Zementart (Bild 2), den Wasserzementwert (Bild 3) und den Zementgehalt (Bild 4). In Bild 2 sind Prismen der Versuchsreihe A aus Mörtel mit fünf verschiedenen Zementen und dem einheitlichen Zementgehalt von 375

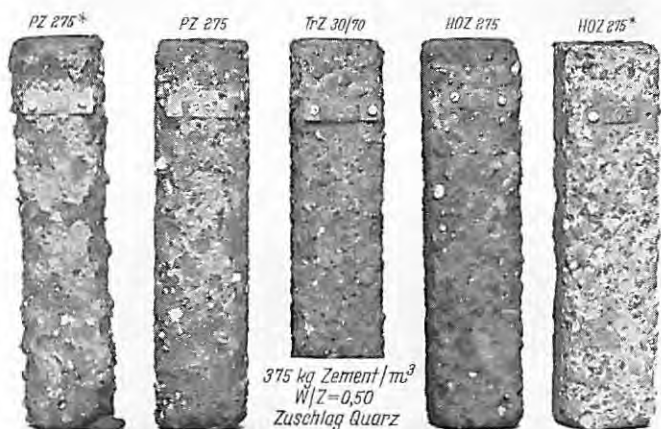


Bild 2 Prismen 4 cm x 4 cm x 16 cm aus Mörtel mit verschiedenen Zementen nach 11 Jahren Lagerung in Wasser mit kalklösender Kohlensäure; \* Zement mit hohem Sulfatwiderstand

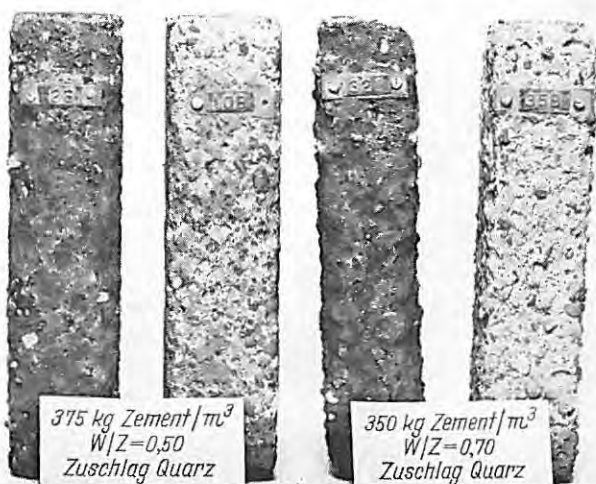


Bild 3 Prismen 4 cm x 4 cm x 16 cm aus Mörtel mit Wasserzementwerten von 0,50 und 0,70 nach 11 Jahren Lagerung in Wasser mit kalklösender Kohlensäure



kg/m<sup>3</sup> sowie dem Wasserzementwert von 0,50 dargestellt. Daraus geht hervor, daß alle Prismen deutliche Anzeichen des lösenden Angriffs zeigten, und zwar abgetragene Oberflächen und schwach abgerundete Ecken und Kanten. Das gilt auch für die hier nicht dargestellten Prismen aus den anderen vier Zementen. Bei den Prismen aus Portlandzement war der Angriff der kalklösenden

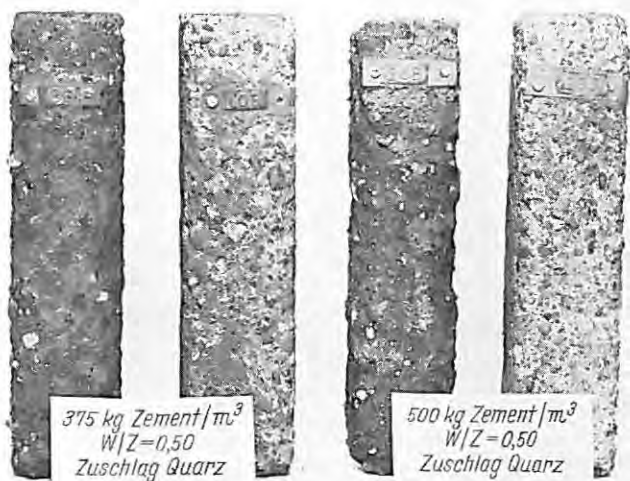


Bild 4 Prismen 4 cm x 4 cm x 16 cm aus Mörtel mit Zementgehalten von 375 und 500 kg/m<sup>3</sup> nach 11 Jahren Lagerung in Wasser mit kalklösender Kohlensäure

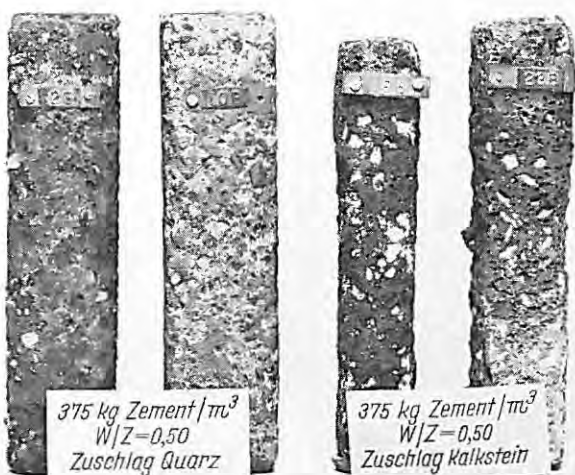


Bild 5 Prismen 4 cm x 4 cm x 16 cm aus Mörtel mit Quarzgestein und Kalkstein als Zuschlag nach 11 Jahren Lagerung in Wasser mit kalklösender Kohlensäure



Kohlensäure offenbar etwas stärker fortgeschritten. Der Mörtel aus Traßhochofenzement 9 verhielt sich ähnlich wie der Mörtel aus Hochofenzement, der Mörtel aus Traßzement nahm eine Zwischenstellung ein. Bei der im Abschnitt 4.2 beschriebenen quantitativen Auswertung ergab sich jedoch, daß die Unterschiede in der Dicke der abgetragenen Schichten nur so gering waren, daß sie für den Bestand eines Betonbauwerks keine praktische Bedeutung haben.

Ähnliche Feststellungen ergaben sich auch für den Einfluß des Wasserzementwerts (Versuchsreihe C) und des Zementgehalts (Versuchsreihe B) in dem hier überprüften Bereich. Bild 3 läßt erkennen, daß sich bei den mit dem höheren Wasserzementwert von 0,70 hergestellten und damit poröseren Mörteln (rechter Bildteil) ein stärkerer Abtrag ergab als bei den Mörteln mit dem niedrigeren Wasserzementwert von 0,50 und mit dementsprechend dichterem Gefüge (linker Bildteil). Der Zustand der im Bild 4 abgebildeten Prismen deutet darauf hin, daß bei gleichem Wasserzementwert der höhere Zementgehalt von  $500 \text{ kg/m}^3$  (rechter Bildteil) zu einem etwas verstärkten Abtrag führte als der zur Herstellung eines dichten Mörtels ausreichende Zementgehalt von  $375 \text{ kg/m}^3$ .

Deutlich stärker wurden jedoch die Mörtelprismen angegriffen, die aus dichtem Kalkstein als Zuschlag hergestellt worden waren. Das ist an den in Bild 5 dargestellten Prismen deutlich zu erkennen. Aus den Mörtelprismen mit Quarzgestein als Zuschlag löste sich nur der Zementstein teilweise heraus; bei den Prismen mit Kalkstein löste sich demgegenüber der Kalkstein noch wesentlich stärker als der Zementstein. Infolgedessen bildeten sich tiefe Höhlungen an den Stellen, an denen sich ursprünglich ein Kalksteinkorn befunden hatte. Diese verhältnismäßig starke Auflösung führte, insbesondere von den Ecken und Kanten ausgehend, zu einem verstärkten Abtrag, der im Vergleich mit den Prismen aus Quarzgestein als Zuschlag eine sichtbar größere Querschnittsverminderung zur Folge hatte.

## **4.2. Gewichtsverlust und Oberflächenabtrag**

Für die quantitative Bewertung des Angriffs der kalklösenden Kohlensäure wurde der im Abstand von drei Monaten ermittelte Gewichtsverlust der Prismen bestimmt und über die Rohdichte der Prismen unter Berücksichtigung ihrer ständig sich verkleinernden Oberfläche die Dicke der abgetragenen Schicht in mm berechnet. Die Ergebnisse sind in Bild 6 dargestellt; sie zeigen den Einfluß des Wasserzementwerts, der Zementmenge und der Zuschlagart auf die Abtragung für eine Prüfdauer von elf Jahren. Die unterschiedlich schraffierten Flächen stellen jeweils den Bereich dar, in den alle bei den betreffenden Mörteln untersuchten Zemente fallen.

Aus Bild 6 geht zunächst allgemein hervor, daß zu Beginn der Auslagerung der Abtrag der Prismen verhältnismäßig schnell zunahm. Der Angriff verlangsamte sich dann jedoch mit zunehmender Einwirkdauer. Das ist darauf zurückzuführen, daß nach dem Herauslösen von Calcit und Calciumhydroxid aus den ober-

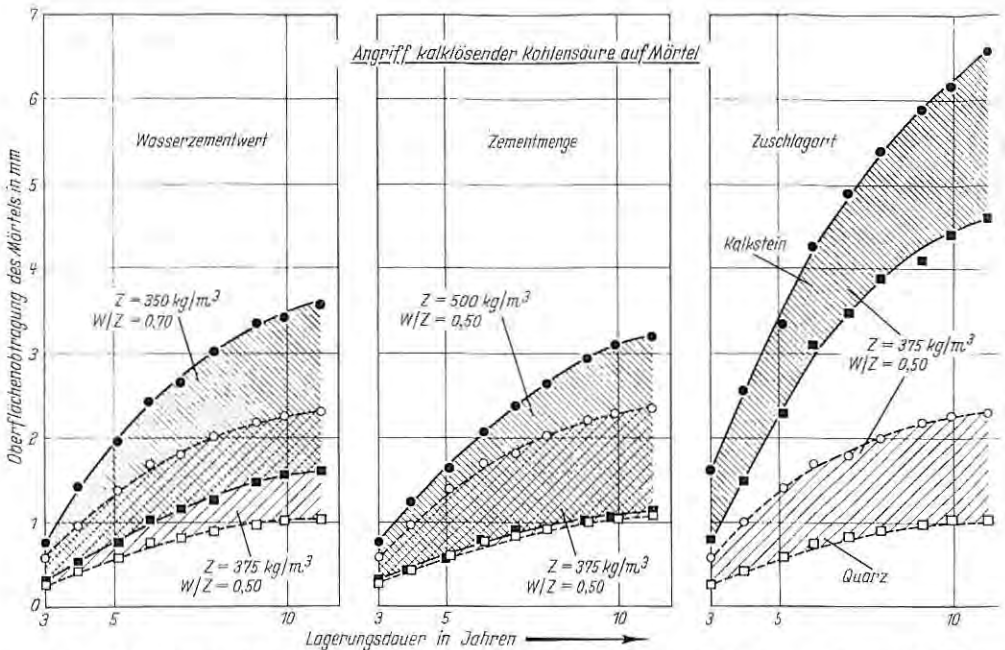


Bild 6 Dicke der Abtragung bei Mörtelprismen 4 cm x 4 cm x 16 cm bei Lagerung in Wasser mit kalklösender Kohler säure

flächennahen Bereichen der Prismen der Diffusionsweg für die Kohlensäure zunehmend größer wurde. Außerdem wurden an der Mörteloberfläche auch die Calciumsilicat- und Calciumaluminatphasen zersetzt, wobei Aluminium- und Eisenhydroxide neben Kieselsäure ausfielen und einen dünnen rostfarbenen Überzug bildeten, der die Diffusion zusätzlich behinderte. Da jedoch bei diesen Reaktionen gleichzeitig die Haftung zwischen Zuschlag und Zementstein beeinträchtigt wurde, löste sich die Schicht mit den Reaktionsprodukten immer wieder ab, so daß der Angriff der kalklösenden Kohlensäure auf die Bestandteile des Mörtels niemals ganz zum Stehen kommen konnte, wohl aber aus den vorher genannten Gründen im Verlauf der Zeit langsamer wurde.

Die in Bild 6 zusammengestellten drei Diagramme geben insbesondere Aufschluß darüber, in welchem Maß sich die Zusammensetzung des Mörtels auf seine Widerstandsfähigkeit gegenüber dem Angriff der kalklösenden Kohlensäure auswirkte. Das Diagramm links zeigt, daß die Oberflächenabtragung bei dem Wasserzementwert von 0,50, d. h. bei dem dichteren Zementstein, etwas geringer war als bei dem höheren Wasserzementwert von 0,70. Bei dem dichteren Mörtel ( $W/Z = 0,50$ ) wurde im Verlauf von elf Jahren eine Schicht von etwa 1,0 bis 2,3 mm und bei dem weniger dichten Mörtel ( $W/Z = 0,70$ ) eine Schicht von etwa 1,5 bis 3,5 mm abgetragen. Die Zementart hatte für die Widerstandsfähigkeit des Mörtels in Anbetracht der klei-

nen Bereiche des Abtrags insgesamt gesehen nur eine untergeordnete Bedeutung; innerhalb der unterschiedlich schraffierten Bereiche lagen jedoch die Werte für Mörtel aus Portlandzement im oberen Teil, die Werte für Mörtel aus Hochofenzement immer im unteren Teil.

Aus dem mittleren Diagramm geht hervor, daß sich bei Erhöhung des Zementgehalts im Mörtel von  $375 \text{ kg/m}^3$  auf  $500 \text{ kg/m}^3$  der Abtrag von etwa maximal 2,3 auf maximal 3,2 mm Dicke erhöhte. Das ist im wesentlichen darauf zurückzuführen, daß mit der Zunahme des Zementgehalts bei gleichbleibendem Wasserzementwert auch der Anteil des säurelöslichen Zementsteins im Mörtel anstieg. Der höhere Zementgehalt wirkte sich jedoch in diesem Fall nicht ganz so ungünstig aus wie eine durch den höheren Wasserzementwert verursachte Porosität des Zementsteins. Alles in allem wurden bei den Mörteln mit den verschiedenen Zementen, Wasserzementwerten und Zementgehalten durch den „sehr starken Angriff“ der kalklösenden Kohlensäure nur Schichten bis höchstens 3,5 mm Dicke im Verlauf von elf Jahren abgetragen, was für massigere Bauteile in der Praxis nicht bedeutsam sein würde.

Ein deutlicherer Unterschied in der Abtragung ergab sich jedoch, wenn anstelle des säurebeständigen Quarzzuschlags Kalkstein verwendet wurde. Bei sonst gleicher Zusammensetzung wurde beim Mörtel mit Kalkstein als Zuschlag eine Schicht von 4,7 bis 6,6 mm gegenüber einer Schicht von 1,0 bis 2,3 mm bei dem Mörtel mit Quarzzuschlag abgetragen. Aus dem Aussehen der Prismen (Bild 5) geht hervor, daß die dreimal größere Abtragung auf die im Vergleich zu Zementstein höhere Auflösungsgeschwindigkeit des Kalksteins zurückzuführen ist.

## 5. Folgerungen

Die Untersuchungen mit Mörtelprismen, die in Wasser mit im Mittel mehr als 100 mg kalklösender Kohlensäure je Liter etwa elf Jahre lang lagerten, ergaben, daß dichter Mörtel mit einem Zementgehalt von  $375 \text{ kg/m}^3$ , einem Wasserzementwert von 0,50 und mit Quarzgestein als Zuschlag von kalklösender Kohlensäure nur in geringem Maß angegriffen wird. Dabei ergaben sich Abtragungen von nicht mehr als 1,0 bis 2,3 mm. Die Mörtel aus Hochofenzement wurden etwas weniger angegriffen als die aus Portlandzement; der Unterschied ist jedoch von geringerer praktischer Bedeutung. In Übereinstimmung mit der bereits früher von F. Gille [6] vertretenen Ansicht ist daher für den Widerstand gegen den lösenden Angriff von schwachen Säuren, wie hier gegen die Kohlensäure, der Einfluß der Zementart von geringerer Bedeutung als die Herstellung eines Betons mit dichtem Zementstein, d. h. mit niedrigem Wasserzementwert.

Beton mit dichtem Kalksteinsplitt als Zuschlag ist in fließendem Wasser mit ständiger Erneuerung der angreifenden Säure wesentlich weniger widerstandsfähig als sonst gleich zusammengesetzter Beton mit Quarzgestein als Zuschlag.

Die von diesem Befund abweichenden Ergebnisse von N. Stutterheim und J. H. P. van Aardt [4, 5] sind anscheinend auf Unterschiede in der Versuchsdurchführung zurückzuführen. Diese Autoren lagerten nämlich die Zementmörtelprismen 2,5 cm x 2,5 cm x 25 cm getrennt in je einem Kunststoffbehälter mit 850 ml Schwefelsäure, die je Woche einmal erneuert wurde, unabhängig davon, wie schnell im Einzelfall die Säuremenge neutralisiert wurde. Die Säuremenge je Prisma war demnach begrenzt, und es ist anzunehmen, daß ein Teil der Prüfkörper unkontrolliert lange in neutral gewordenem Wasser lagerte. Maßgebend für den Fortschritt des Angriffs war daher in erster Linie die Säuremenge und weniger die Säureempfindlichkeit der einzelnen Mörtel. Aus diesem Grund ergab sich bei den Prismen, die bei sonst gleicher Zusammensetzung jedoch noch säurelösliche Carbonatgesteine als Zuschlag enthielten, eine scheinbar bessere Beständigkeit in sauren Wässern.

Zur Prüfung der Säurebeständigkeit von Beton ist es jedoch, wie bei den hier beschriebenen Untersuchungen, erforderlich, den ungünstigeren Bedingungen der Praxis entsprechend das Angebot an angreifender Säure im Mittel laufend auf einem Wert zu erhalten, der stets größer ist als der der von der Neutralisierungsgeschwindigkeit abhängige Säureverbrauch. Nur auf diese Weise läßt sich die Widerstandsfähigkeit unterschiedlich zusammengesetzter Mischungen gegenüber einem Säureangriff beurteilen. Deshalb ist die aus den hier beschriebenen Versuchen abgeleitete Folgerung berechtigt, daß zur Herstellung eines Betons mit einem hohen Widerstand gegen den Angriff kalklösender Kohlensäure, in Übereinstimmung mit früheren Empfehlungen [3], ausschließlich säureunlösliche Zuschlagstoffe verwendet werden sollten.

Da hier bei dichtem Mörtel durch Wasser mit Gehalten an kalklösender Kohlensäure von über 100 mg CO<sub>2</sub>/l bei elfjähriger Einwirkung nur eine Oberflächenschicht von wenigen mm Dicke abgetragen wurde und da es sich in der Praxis meistens um massigere Bauteile handelt, deren Gebrauchsfähigkeit [9] dadurch nicht beeinträchtigt wird, erhebt sich die Frage, ob es erforderlich ist, dichten Beton entsprechend der Vorschrift in der DIN 1045 vor dem Zutritt des angreifenden Wassers bereits zu schützen, wenn der Gehalt an kalklösender Kohlensäure den in der DIN 4030 festgelegten Grenzwert von 60 mg CO<sub>2</sub>/l überschreitet. Das Ergebnis der hier beschriebenen Lagerungsversuche rechtfertigt die Empfehlung, den oberen Grenzwert für den Bereich des „starken Angriffs“ nach DIN 4030 auf 100 mg CO<sub>2</sub>/l zu erhöhen.

Nach DIN 1045, Abschnitt 6.5.7.4, darf u. a. der Wasserzementwert des Betons, der einem chemisch „starken Angriff“ ausgesetzt wird, nicht größer als 0,50 sein. Diesen Wasserzementwert wiesen die hier untersuchten Mörtel A mit geringer Abtragung auf (Tafel 2 und Bild 6). Es wurde gefunden, daß für die Abtragung unter sonst gleichen Verhältnissen im wesentlichen die Dichte des Zementsteins und weniger ausgeprägt der Zementsteingehalt (Zementgehalt) maßgebend war. Dies gilt naturgemäß auch für Beton.

Somit können die Feststellungen dieser Versuche mit dem Mörtel 0/7 mm auch auf Beton übertragen werden. Für Bauteile mit hohem Widerstand gegen „starken Angriff“ durch kalklösende Kohlensäure wäre demnach ein Beton mit einem Wasserzementwert von 0,50 geeignet, der z. B. mit Quarzgestein als Zuschlag nach Sieblinie B<sub>32</sub> hergestellt wird und eine Konsistenz an der oberen Grenze von K1 (Verdichtungsmaß  $v = 1,26$ ) aufweist. Für einen solchen praktisch vollständig verdichtbaren Frischbeton ergibt sich rechnerisch [10] ein Zementgehalt von rd. 320 kg/m<sup>3</sup>, ein Wassergehalt von rd. 160 kg/m<sup>3</sup> und ein Gehalt an Zuschlag (Rheinkiessand) von rd. 1875 kg/m<sup>3</sup>.

Man erkennt an diesem Beispiel, daß der bei den Versuchen mit Mörtel gefundene hohe chemische Widerstand bei Beton bereits mit einem Zementgehalt von 320 kg/m<sup>3</sup> zu gewährleisten ist. Nach den Ausführungen in Abschnitt 4.2 dürfte sein Widerstand eher noch etwas höher einzuschätzen sein als der des untersuchten Mörtels A mit dem gleichen Wasserzementwert von 0,50, jedoch mit 375 kg Zement/m<sup>3</sup>.

## 6. Zusammenfassung

Die Versuche, bei denen Prismen 4 cm x 4 cm x 16 cm aus Zementmörtel mit unterschiedlicher Zusammensetzung in Wasser mit kalklösender Kohlensäure lagerten, führten zu folgenden Ergebnissen:

6.1. Nach elfjähriger Lagerung der Prismen in Wasser mit Gehalten an kalklösender Kohlensäure von im Mittel mehr als 100 mg CO<sub>2</sub>/l zeigte sich deren Wirkung in einer Abtragung an der Oberfläche und im weiter fortgeschrittenen Stadium auch durch Abrundungen an Ecken und Kanten.

6.2. Aus der Bestimmung des Gewichtsverlusts wurde die Abtragung in mm berechnet; sie nahm anfangs stärker und später nur noch langsam zu.

6.3. Für den Widerstand gegen den „starken Angriff“ durch kalklösende Kohlensäure war in erster Linie die Dichtigkeit der Prismen maßgebend. Bei Mörtel mit einem Wasserzementwert von 0,50, einem Zementgehalt von 375 kg/m<sup>3</sup> und mit besonders gut abgestuftem Zuschlag aus Quarzgestein wurde nach elf Jahren Lagerung und praktisch unabhängig von der Zementart nur eine Abtragung bis 2,3 mm Dicke festgestellt.

6.4. Kalksteinsplitt als Zuschlag führte zu einem etwa dreifach höheren Gewichtsverlust der Prismen, da der Kalkstein im schwach fließenden Wasser mit ständig erneuertem hohen Gehalt an kalklösender Kohlensäure schneller aufgelöst wurde als der Zementstein.

6.5. Aus dem Untersuchungsergebnis ergibt sich die Folgerung, daß der derzeit in der DIN 4030 festgelegte obere Grenzwert für den Bereich des „starken Angriffs“ der kalklösenden Kohlensäure von 60 auf 100 mg/l erhöht werden könnte, ohne die Dauerhaftigkeit eines Bauteils aus Beton oder Stahlbeton zu gefährden. Voraussetzung ist jedoch eine angemessene Betondeckung des Bewehrungsstahls nach DIN 1045, Tabelle 10, Zeile 4.

6.6. Die Feststellungen dieser Versuche mit Mörtelprismen können auch auf Beton übertragen werden. Der Mörtel 0/7 mm mit einem Wasserzementwert von 0,50 und einem Zementgehalt von  $375 \text{ kg/m}^3$ , der sich als ausreichend widerstandsfähig gegen Wasser mit im Mittel rd. 100 mg kalklösender Kohlensäure je Liter erwiesen hat, entspricht einem Beton mit Quarzzuschlag (Rheinkiesand) nach Sieblinie B<sub>32</sub>, einem Zementgehalt von rd.  $320 \text{ kg/m}^3$ , einem Wassergehalt von rd.  $160 \text{ kg/m}^3$  und einem Gehalt an Zuschlag von rd.  $1875 \text{ kg/m}^3$ . Frischbeton mit dieser Zusammensetzung ist bei einer Konsistenz an der oberen Grenze K 1 praktisch vollständig verdichtbar.

## SCHRIFTTUM

- [1] Grün, R., und K. Obenauer: Einwirkung von Kohlensäure auf Zementmörtel und Beton. Zement 33 (1944) H. 1, S. 10/12.
- [2] Mall, G.: Einwirkung von kohlesäurehaltigem Wasser auf Zementmörtel und Beton. Zement-Kalk-Gips 4 (1951) H. 11, S. 291/293.
- [3] Graf, O., und H. Göbel: Verhinderung von Bauschäden. Deutscher Fachzeitschriften- und Fachbuch-Verlag, Stuttgart 1934.
- [4] Stutterheim, N., und J. H. P. van Aardt: The corrosion of concrete sewers and some possible remedies. South African Industrial Chemist 7 (1953) Nr. 10, S. 185/195.
- [5] van Aardt, J. H. P.: Säureangriff auf Beton bei kalkhaltigen Zuschlagstoffen. Zement-Kalk-Gips 14 (1961) H. 10, S. 404/447.
- [6] Gille, F.: Über den Einfluß des Kalkgehalts des Zements und Zuschlags auf das Verhalten des Betons in sauren Wässern. beton 12 (1962) H. 10, S. 467/470; ebenso Betontechnische Berichte 1962, Beton-Verlag, Düsseldorf 1963, S. 147/158.
- [7] Höll, K.: Wasser-Untersuchung, Beurteilung, Aufbereitung. 5. Auflage, Verlag W. de Gruyter, Berlin 1970.
- [8] Tillmanns, J.: Die chemische Untersuchung von Wasser und Abwasser. Verlag W. Knapp, Halle 1932.
- [9] Empfehlungen des Arbeitsausschusses „Ufereinfassungen“ der Hafentechnischen Gesellschaft und der Deutschen Gesellschaft für Erd- und Grundbau. 4. Auflage, Verlag von W. Ernst & Sohn, Berlin/München/Düsseldorf 1971.
- [10] Walz, K.: Herstellung von Beton nach DIN 1045. 2. Auflage, Beton-Verlag, Düsseldorf 1972, Abschnitt 7.