

# Einfluß des Kalksteins im Portlandkalksteinzement auf die Dauerhaftigkeit von Beton

Von Eberhard Siebel und Siegbert Sprung, Düsseldorf

## Übersicht

*Kalkstein als Zuschlagstoff für Zement wird seit längerer Zeit in Frankreich und inzwischen auch in der Bundesrepublik zur Herstellung von Portlandkalksteinzement verwendet. Portlandkalksteinzemente (PKZ) werden im allgemeinen durch gemeinsames Vermahlen von Portlandzementklinker und Kalkstein hergestellt. Nicht jeder Kalkstein kann jedoch hierfür eingesetzt werden. Im Zusammenhang mit der Erstellung der europäischen Zementnorm ENV 197 wurden im Forschungsinstitut in Düsseldorf umfangreiche Versuche durchgeführt, um die Eignung der Kalksteine zur Herstellung von Portlandkalksteinzementen und deren Anwendung im Beton zu überprüfen. Hierbei wurde besonders der Dauerhaftigkeit des Betons nachgegangen.*

*Durch Zumahlung eines Kalksteins entsteht ein Festigkeitsverlust, der durch Feinermahlen der Klinkerkomponente des PKZ ausgeglichen werden kann. Das Carbonatisierungsverhalten des PKZ entspricht dem des PZ, wenn die Zemente in etwa die gleiche Normdruckfestigkeit haben. Einen erheblichen Einfluß hat die Kalksteinart auf den Frostwiderstand des mit PKZ hergestellten Betons. Sowohl tonige als auch poröse Bestandteile im Kalkstein können den Frostwiderstand des Betons deutlich herabsetzen. An die für PKZ eingesetzten Kalksteine müssen daher besondere Anforderungen hinsichtlich des Calciumcarbonatgehaltes und der Art und Menge der tonigen Bestandteile gestellt werden. Weiterhin müssen die Kalksteine daraufhin überprüft werden, ob sie poröse Bestandteile enthalten. Zur Beurteilung des Kalksteins wurden drei Kennwerte festgelegt: der Calciumcarbonatgehalt, der Methylenblau-Wert und der Gehalt an organischen Bestandteilen.*

## 1 Einleitung

Im Rahmen der europäischen Zementnormung wurde schon Ende der 70er Jahre von Frankreich der Antrag gestellt, Portlandkalksteinzement (PKZ) in die Zementnorm ENV 197 [1] mit aufzunehmen. Hierfür waren neben wirtschaftlichen auch technische Gesichtspunkte maßgebend, die in erster Linie die Verminderung des Wasseranspruchs betrafen. Bei mehreren Ländern bestanden jedoch Bedenken hinsichtlich der Dauerhaftigkeit, insbesondere des Frost-

widerstandes der mit diesen Zementen hergestellten Betone. Ein umfangreicher Ringversuch, bei dem der Frostwiderstand in mehreren europäischen Laboratorien der Zementindustrie untersucht wurde, ergab, daß mit einem der drei industriell hergestellten Portlandkalksteinzemente ein ausreichender Frostwiderstand des Betons nicht sichergestellt werden konnte. Es war daher anzunehmen, daß sich nicht jeder Kalkstein für die Herstellung von PKZ eignet.

Zur Klärung der Frage, inwieweit Kalkstein als Zuschlagstoff für die Zementherstellung verwendet werden kann, wurden im Forschungsinstitut der Zementindustrie mit Unterstützung der AIF umfangreiche Untersuchungen an Kalkstein, an Kalksteinzementen und an mit diesen Zementen hergestellten Betonen durchgeführt. Die Einzelergebnisse der insgesamt durchgeführten Untersuchungen wurden in [2] zusammengestellt. Über die Auswahlkriterien hinsichtlich der mineralogischen, chemischen und physikalischen Eigenschaften der Kalksteine, die zur Herstellung von Portlandkalksteinzement eingesetzt werden sollen, wurde in [3] eingehend berichtet. Die nachfolgenden Ausführungen gehen auf die Eigenschaften der mit PKZ hergestellten Betone ein und zeigen auf, welchen Einfluß der Kalkstein auf diese Eigenschaften hat. Sie behandeln vorrangig die Dauerhaftigkeit der Betone.

## 2 Stand der Erkenntnisse

Eine ausführliche Darstellung der Literatur über die Verwendung von Kalkstein für Portlandkalksteinzemente ist in [2] und [3] enthalten. Im folgenden werden aus anderen Untersuchungen Angaben bezüglich der Dauerhaftigkeit der mit PKZ hergestellten Betone gemacht, die neben der Verarbeitbarkeit und Festigkeit für die Beurteilung der Leistungsfähigkeit von Zementen maßgebend ist [4]. Die Dauerhaftigkeit, insbesondere der Frostwiderstand von mit PKZ hergestellten Betonen, wurde bisher noch nicht systematisch untersucht. Der Einfluß von Kalksteinzusätzen wurde unterschiedlich beurteilt [5, 6, 7 und 8]. In einem europäischen Ringversuch, der Aufschluß über die Leistungsfähigkeit der Zemente geben sollte, wurden deshalb neben den auch in der Bundesrepublik Deutschland erprobten Portland- (PZ) und Hochofenzementen (HOZ) ein ausländischer Puzzolanzement (PuZ) und drei ausländische Portlandkalksteinzemente (F 1 mit 11 Gew.-%, F 2 mit 26 Gew.-% und F 3 mit 12 Gew.-% Kalkstein) eingesetzt (siehe auch [9]). Es wurden Betone mit Wasserzementwerten von rd. 0,65, von 0,60 und 0,45 hergestellt und u. a. der Frostwiderstand mit dem Würfelverfahren geprüft (siehe [10, 11] und Abschnitt 4.4.2). Erfahrungsgemäß hat ein Beton dann einen hohen Frostwiderstand, wenn bei diesem Verfahren ein Gewichtsverlust von 10% nicht überschritten wird. Aus den in Bild 1 zusammengestellten Untersuchungsergebnissen geht hervor, daß erfahrungsgemäß im allgemeinen Betone mit Wasserzementwerten oberhalb von 0,60 keinen, Betone mit Wasserzementwerten  $\leq 0,60$  einen ausreichenden Frostwiderstand aufwiesen. Als Ausnahme erwies sich bei diesen Versuchen der Beton mit dem PKZ F 1, der trotz eines verhältnismäßig geringen Kalksteingehalts von nur 11 Gew.-% selbst bei dem Wasserzementwert von 0,45 keinen ausreichenden Widerstand aufwies. Es wurde vermutet, daß der nicht ausreichende

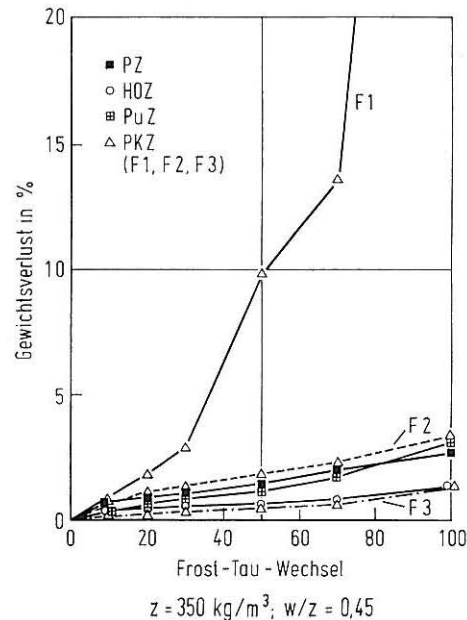
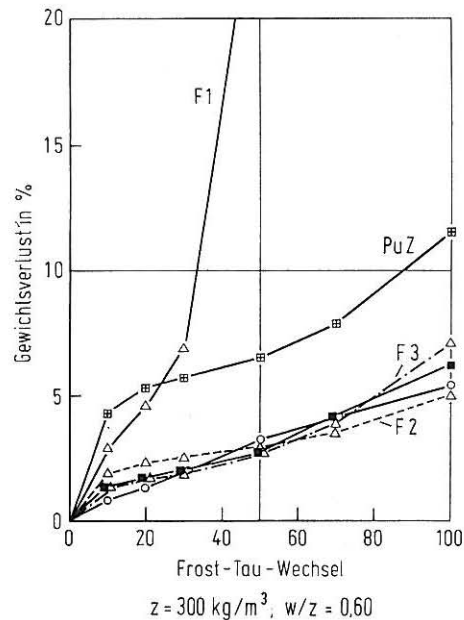
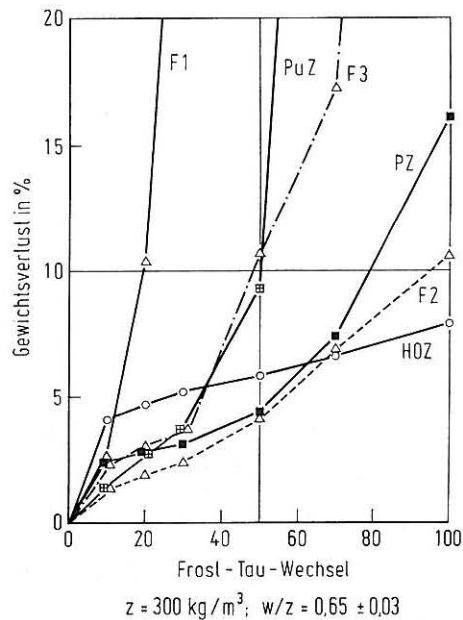


Bild 1 Gewichtsverlust von Betonen mit unterschiedlichen Zementen: Portlandzement (PZ), Hochofenzement (HOZ), Puzzolanzement (PuZ) und drei Portlandkalksteinzementen (F1, F2, F3) nach Frostbeanspruchung mit dem Würfelverfahren — Auftauen und Einfrieren von Würfeln unter Wasser

de Frostwiderstand auf den Kalkstein des PKZ F1 zurückzuführen war.

### 3 Ziel und Umfang der Untersuchungen

Der Einfluß unterschiedlicher Kalksteine auf die Eigenschaften der mit PKZ hergestellten Mörtel und Betone, insbesondere ihre Dauerhaftigkeit, war bisher nicht bekannt. Die im folgenden dargestellten Untersuchungen hatten deshalb zum Ziel, den Einfluß unterschiedlicher Stoffeigenschaften von Kalksteinen im PKZ auf Festigkeit, Carbonatisierungsverhalten und Frostwiderstand von Beton festzustellen. Hierzu wurden Mörtel entsprechend DIN 1164 zur Bestimmung der Carbonatisierungstiefe in Abhängigkeit von der Zeit und Betone zur Bestimmung der Druckfestigkeit und des Frostwiderstandes hergestellt. Neben der Verwendung unterschiedlicher Kalksteine mit spezifischen Oberflächen nach Blaine zwischen rd. 3000 und 10000 cm<sup>2</sup>/g zur Herstellung des PKZ wurden zum Vergleich auch Flugasche, Traß- und Quarzmehl in die Untersuchungen einbezogen.

## 4 Versuchsdurchführung

### 4.1 Ausgangsstoffe

#### 4.1.1 Zement

Zur Herstellung der Zemente wurden 29 Kalksteine, 3 Flugaschen, 1 Quarz- und 1 Traßmehl verwendet. Während die Kalksteinproben K 0, K 18, K 19, K 28 und K 34 bei Anlieferung bereits eine ausreichend hohe Mahlfeinheit aufwiesen, wurden aus den übrigen grobstückigen Kalksteinen Mehle mit Mahlfeinheiten von rd. 3000 bis 10000 cm<sup>2</sup>/g (Blaine) — vorwiegend rd. 5500 cm<sup>2</sup>/g — ermahlen. Angaben über den Calciumcarbonatgehalt (Bestimmung nach CEN-Vorschlag [1]), den Gehalt an organischen Bestandteilen TOC (Total Organic Carbon Content [12]), die spezifische Oberfläche, den Wasseranspruch und den Methylenblau-Wert [13], der ein Kennwert für quellende tonige Bestandteile ist, gehen aus Tafel 1 hervor. Auch die Traßprobe wurde auf Feinheiten von 3000 bis 8000 cm<sup>2</sup>/g gemahlen. Die Flugaschen mit Feinheiten zwischen 3200 und 5300 cm<sup>2</sup>/g und das Quarzmehl mit einer Feinheit von 5200 cm<sup>2</sup>/g wurden im Anlieferungszustand verwendet.

Zur Herstellung der Portland-Komposit-Zemente wurden zwei PZ 35 F (PZ 35 F-A und PZ 35 F-I) und ein PZ 45 F (PZ 45 F-A) verwendet. Der PZ 35 F-A und der PZ 45 F-A wurden im Zementwerk aus dem gleichen Klinker ermahlen und hatten einen rechnerischen C<sub>3</sub>A-Gehalt von rd. 11 Gew.-%. Der PZ 35 F-I wies einen geringeren C<sub>3</sub>A-Gehalt von rd. 8 Gew.-% auf. Die Portland-Komposit-Zemente enthielten in der Regel 15 Gew.-% Zumahlstoffe. Für einige Zusatzversuche wurden auch PKZ mit 25 Gew.-% Kalkstein hergestellt. Einzelwerte zur Kennzeichnung der physikalischen Eigenschaften der Zemente gehen aus [2] und [3] hervor.

Zusätzliche Versuche wurden auch mit werksmäßig hergestellten PKZ, die Kalksteingehalte zwischen 15 und 19 Gew.-% enthielten, durchgeführt. Die 28-Tage-Normdruckfestigkeit dieser Zemente lag zwischen 46 und 49 N/mm<sup>2</sup>.

#### 4.1.2 Zuschlag und Zugabewasser

Als Zuschlag wurde Rheinkiesand der Fraktionen 0/2 mm, 2/8 mm, 8/16 mm und 16/32 mm aus dem Raum Düsseldorf, Quarzmehl 0/0,25 mm und Quarzsand 0/1 mm aus dem Raum Köln verwendet. Die Zuschläge entsprachen der Zuschlagnorm DIN 4226, Teil 1. Beim Frostversuch lag der Gewichtsverlust der Zuschläge, geprüft nach DIN 4226, Teil 3, Abschnitt 3.5.1 — Widerstand gegen starke Frosteinwirkung; Einfrieren und Auftauen unter Wasser — unter

Tafel 1 Chemische Zusammensetzung und physikalische Eigenschaften der Kalksteinproben

| Herkunft               | Nr.  | CaCO <sub>3</sub><br>(CEN) | TOC                | Oberfl.            | WA                 | Methylen- |
|------------------------|------|----------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|-----------|
|                        |      |                            |                    | n. Blaine          | DIN 1164           | blau-Wert |
|                        |      |                            |                    | cm <sup>2</sup> /g | cm <sup>3</sup> /g | Gew.-%    |
| Devon                  | K 8  | 97,9                       | 0,06               | 4930               | 0,30               | 0,07      |
| Unterer<br>Muschelkalk | K 3  | 86,5                       | 0,26               | 5390               | 0,29               | 0,83      |
|                        | K 20 | 79,1                       | 0,16               | 5380               | 0,25               | 0,50      |
|                        | K 21 | 85,2                       | 0,15               | 5200               | 0,29               | 0,53      |
|                        | K 26 | 84,4                       | 0,10               | 5700               | 0,25               | 0,30      |
|                        | K 28 | 86,0                       | 0,12               | 4820 <sup>1)</sup> | 0,28               | 0,49      |
|                        | K 34 | 83,4                       | 0,11               | 4750 <sup>1)</sup> | 0,28               | 0,86      |
| Oberer<br>Muschelkalk  | K 30 | 83,2                       | 0,13               | 5380               | 0,26               | 0,60      |
|                        | K 32 | 77,3                       | 0,12               | 5540               | 0,26               | 0,69      |
| Jüra                   | K 4  | 95,5                       | 0,12               | 5670               | 0,22               | 0,30      |
|                        | K 9  | 91,3                       | 0,13               | 5370               | 0,24               | 0,32      |
|                        | K 10 | 83,9                       | 0,13               | 5160               | 0,29               | 1,10      |
|                        | K 11 | 91,0                       | 0,14               | 5050               | 0,27               | 0,63      |
|                        | K 15 | 89,8                       | 0,11               | 5260               | 0,21               | 0,27      |
|                        | K 17 | 88,6                       | 0,08               | 5150               | 0,24               | 0,30      |
|                        | K 29 | 90,0                       | 0,13               | 6590               | 0,26               | 1,06      |
|                        | K 31 | 85,4                       | 0,37               | 6010               | 0,24               | 1,12      |
|                        | K 33 | 84,3                       | 0,41               | 5800               | 0,26               | 1,32      |
| Obere<br>Kreide        | K 0  | 97,3                       | 0,13               | 6970               | 0,26               | 0,27      |
|                        | K 1  | 58,3                       | 0,31               | 5460               | 0,45               | 2,53      |
|                        | K 2  | 70,4                       | 0,28               | 5630               | 0,42               | 1,77      |
|                        | K 12 | 77,7                       | 0,24               | 5730               | 0,36               | 2,43      |
|                        | K 22 | 79,2                       | 0,20               | 5600               | 0,25               | 0,83      |
|                        | K 23 | 68,3                       | 0,22               | 6400               | 0,27               | 1,16      |
|                        | K 24 | 74,0                       | 0,17               | 6400               | 0,26               | 0,92      |
|                        | K 25 | 74,0                       | 0,32               | 5650               | 0,26               | 1,09      |
| Frankreich             | K 7  | 98,3                       | 0,06               | 5480               | 0,24               | 0,32      |
|                        | K 13 | 89,9                       | 0,30               | 5030               | 0,24               | 0,30      |
|                        | K 14 | 98,0                       | 0,14               | 5840               | 0,22               | 0,08      |
|                        | K 16 | 87,3                       | 0,25               | 5070               | 0,22               | 0,33      |
| Österreich             | K 18 | 94,9                       | 0,08 <sup>1)</sup> | 6900 <sup>1)</sup> | 0,27               | 0,26      |
|                        | K 19 | —                          | 0,09               | 6100 <sup>1)</sup> | 0,27               | 0,56      |
| Schweiz                | K 27 | 94,3                       | 0,14               | 5940               | 0,19               | 0,20      |

<sup>1)</sup> Anlieferung

2 Gew.-%. Die Zuschläge entsprachen somit den Anforderungen an den erhöhten Frostwiderstand (eFT). Als Zugabewasser wurde Düsselbacher Leitungswasser verwendet.

## 4.2 Betonzusammensetzung und -herstellung

Der Zementgehalt betrug einheitlich  $300 \text{ kg/m}^3$ . Es wurde ein Wasserzementwert von 0,60 gewählt. Dieser entspricht dem Grenzwert der DIN 1045 für Beton mit hohem Frostwiderstand. Die Sieblinie des Zuschlags lag im mittleren Bereich von BC 32. Die trockenen Betonausgangsstoffe wurden gewichtsmäßig zugegeben. Nach Zugabe des Wassers wurden die Betone in einem 150-l-Tellermischer 2 min gemischt. Je Beton wurden 12 Würfel mit einer Kantenlänge von 10 cm hergestellt. Je zwei Würfel dienten der Frostprüfung im Alter von 28 und 56 Tagen, je drei Würfel der Druckfestigkeitsprüfung im Alter von 7 und 28 Tagen und zwei Würfel wurden für einige zusätzliche Frostversuche verwendet.

Für die Durchführung der Zusatzversuche zur Prüfung des Frost-Tausalz-Widerstandes wurden Betone mit einem Zementgehalt von  $320 \text{ kg/m}^3$ , einem Wasserzementwert von 0,50, dem Grenzwasserzementwert für Beton mit hohem Frost-Tausalz-Widerstand, einer Sieblinie im oberen Bereich von AB 32 und einem durch einen Luftporenbildner erzeugten Luftgehalt von rd. 4,5 Vol.-% hergestellt.

Der Beton wurde unter Stochern in einer Schicht in die Formen gefüllt und anschließend auf dem Rütteltisch rd. 15 sec verdichtet. Die Probekörper lagerten bis zum Entformen im Alter von einem Tag im Arbeitsraum bei rd.  $20^\circ\text{C}$  unter feuchten Tüchern und anschließend sechs Tage in Wasser von rd.  $20^\circ\text{C}$ . Nach der Wasserlagerung wurden die meisten Probekörper im Klimaraum bei  $20^\circ\text{C}$  und 65% rel. Luftfeuchtigkeit (20/65), zwei 10-cm-Würfel für eine zusätzliche Frostprüfung bei  $20^\circ\text{C}$  und 80% rel. Luftfeuchtigkeit (20/80) gelagert.

## 4.3 Mörtel

Zur Bestimmung des Carbonatisierungsfortschritts in Abhängigkeit von der Zeit und für zusätzliche Frostversuche wurden Mörtelprismen  $4 \text{ cm} \times 4 \text{ cm} \times 16 \text{ cm}$  nach DIN 1164 ( $w/z = 0,50$ ) hergestellt. Sie verblieben mit Glasplatten abgedeckt einen Tag in den Formen bei  $20^\circ\text{C}$  und mindestens 98% rel. Feuchte, lagerten anschließend sechs Tage unter Wasser bei  $20^\circ\text{C}$  und danach im Klimaraum bei  $20^\circ\text{C}$  und 65% rel. Feuchte.

## 4.4 Prüfungen

### 4.4.1 Frischbetonkonsistenz

Als Maß für die Konsistenz des Frischbetons diente das Verdichtungsmaß nach DIN 1048.

### 4.4.2 Festbeton

Neben der Festigkeit wurden mehrere Verfahren zur Prüfung der Dauerhaftigkeit der mit PKZ hergestellten Betone durchgeführt.

### *Druckfestigkeit*

Die Druckfestigkeit aller Betone wurde an je drei 10-cm-Würfeln nach 7 und 28 Tagen nach DIN 1048 geprüft.

### *Frostwiderstand*

Zur Bestimmung des Frostwiderstandes wurden das Würfel- und das Prismenverfahren angewendet.

Die Frostprüfung nach dem Würfelverfahren wurde an je zwei 10-cm-Würfeln im Alter von 28 und 56 Tagen durchgeführt [10, 11]. Hierfür wurden die Würfel einen Tag vor Beginn der Frostprüfung unter Wasser gelagert, anschließend unter Wasser in Messingbehältern bei  $-15^{\circ}\text{C}$  16 Stunden eingefroren und danach in einem Wasserbad von  $20^{\circ}\text{C}$  8 Stunden aufgetaut. Das entspricht einem Frost-Tau-Wechsel pro Tag. Insgesamt wurden 100 Frost-Tau-Wechsel durchgeführt. Als Maß für den Frostwiderstand wurde der Gewichtsverlust bestimmt. Dieses Verfahren wird auch vom Institut für Bautechnik für die Zulassung neuer Zemente angewendet. Es kann davon ausgegangen werden, daß ein Beton in der Praxis dann einen ausreichenden Frostwiderstand aufweist, wenn der Gewichtsverlust bei dieser Prüfung 10% nicht überschreitet. Dies gilt jedoch nur, wenn die Prüfung streng entsprechend der Anleitung [11] durchgeführt wird. Bei einigen Betonen wurden als Zusatzversuche zwei 10-cm-Würfel, die im Klimaraum 20/80 vorgelagert wurden, der beschriebenen Frostprüfung im Alter von 28 Tagen unterzogen.

Für das Prismenverfahren [10] wurden sechs Prismen zwei Tage vor Beginn der Frostprüfung unter Wasser gelagert. Jeweils drei Prismen wurden unter Wasser stehend in Messingbehältern bei  $-15^{\circ}\text{C}$  16 Stunden eingefroren und 8 Stunden bei  $20^{\circ}\text{C}$  wieder aufgetaut. Drei weitere Prismen wurden zum Vergleich im Wasser bei  $20^{\circ}\text{C}$  gelagert. Zur Bestimmung der Frostschädigung wurde der dynamische E-Modul an den frostbeanspruchten Prismen und an den im Wasser ohne Frostprüfung gelagerten Prismen zum selben Zeitpunkt ermittelt. Durch Bezug des dynamischen E-Moduls der frostbeanspruchten Prüfkörper auf den der im Wasser gelagerten Prüfkörper ergibt sich der relative dynamische E-Modul in Prozent. Er ist ein Beurteilungskriterium für die Gefügeschädigung infolge Frostangriff. Ein Absinken des Wertes unter 85% läßt auf eine deutliche Schädigung schließen. Zusätzlich wurde der Verlust an abgewittertem Feststoffvolumen bei den Prismen bestimmt und in die Beurteilung mit einbezogen.

### *Frost-Tausalz-Widerstand*

Die Frost-Tausalz-Prüfung wurde mit dem modifizierten Würfelverfahren durchgeführt. Hierfür wurden die Würfel nicht in Wasser, sondern in 3%iger NaCl-Lösung eingefroren. Ansonsten wurde das Verfahren wie bereits beschrieben durchgeführt.

### *Carbonatisierung*

Die Carbonatisierungsversuche an Mörteln wurden an den nach DIN 1164 hergestellten sieben Tage unter Wasser und anschließend im Klimaraum 20/65 gelagerten Prismen durchgeführt. Hierfür wurden zu den vorgegebenen Zeitpunkten, beginnend 14 Tage nach Herstellung, von den Prismen Scheiben mit einer Dicke von rd. 3 cm

abgespalten und daraus durch Besprühen mit Phenolphthalein die Carbonatisierungstiefe bestimmt [11, 14]. Die Carbonatisierungstiefe wurde bis zu einem Alter von drei Jahren ermittelt.

## 5 Darstellung und Erörterung der Versuchsergebnisse

### 5.1 Frischbetonkonsistenz

Die Konsistenz der Betone mit PZ, geprüft mit dem Verdichtungsmaß  $v$ , lag in einem für Beton dieser Zusammensetzung üblichen Bereich von rd. 1,15. Nur das Verdichtungsmaß des Betons mit dem Portlandzement PZ 35 F-I war gegenüber den anderen Betonen mit Portlandzement geringer. Die weichere Konsistenz ist unter anderem auf die mit  $2450 \text{ cm}^2/\text{g}$  (Blaine) geringere Mahlfineinheit des Zements zurückzuführen.

Die Betone mit den Portlandkalksteinzementen wiesen bis auf wenige Ausnahmen eine etwas weichere Konsistenz als die mit Portlandzementen auf. Dies dürfte in erster Linie auf die durch den Kalksteinanteil verbreiterte Kornverteilung und auf die Verdünnung des Klinkeranteils zurückzuführen sein. Eine gegenüber PZ-Betonen etwas steifere Konsistenz ergab sich nur bei Betonen mit den Portlandkalksteinzementen, deren Kalksteinanteil einen erhöhten Tonmineralegehalt aufwies. Weder bei einer Erhöhung der Kalksteingehalte von 15 auf 25 Gew.-% noch bei einer Erhöhung der Mahlfineinheit der Kalksteine auf Werte über  $5000 \text{ cm}^2/\text{g}$  ließ sich im allgemeinen ein signifikanter Einfluß auf die Konsistenz des Betons nachweisen. Während die verwendeten Quarz- und Traßmehle im Zement die Konsistenz des Betons praktisch nicht beeinflussten, hatten Betone, deren Zement Flugasche enthielt, im allgemeinen eine etwas weichere Konsistenz.

### 5.2 Festbetoneigenschaften

#### 5.2.1 Druckfestigkeit

Der Beton mit PZ 45 F erreichte eine um rd. 19% höhere 7-Tage-Druckfestigkeit und eine um rd. 16% höhere 28-Tage-Druckfestigkeit als der Beton mit dem aus dem gleichen Werk stammenden PZ 35 F-A. Die Druckfestigkeit des Portlandzementes PZ 35 F-I war nach 7 Tagen deutlich und nach 28 Tagen etwas geringer als die des Portlandzementes PZ 35 F-A [2]. Dies ist auf die Unterschiede in der Mahlfineinheit und im  $\text{C}_3\text{A}$ -Gehalt zurückzuführen.

Die 7-Tage-Druckfestigkeit der Betone mit PKZ auf der Basis des PZ 35 F-A, die 15% Kalkstein mit rd.  $5500 \text{ cm}^2/\text{g}$  enthielten, war i. M. um rd. 20% niedriger als die Festigkeit der entsprechenden Vergleichsbetone aus PZ 35 F. Die 7-Tage-Druckfestigkeiten der PKZ-Betone mit den Kalksteinen K 13, K 20 und K 21 sind im linken Teil von Bild 2 im Vergleich zur 7-Tage-Druckfestigkeit des PZ-Betons dargestellt. Daraus geht zunächst hervor, daß die Kalksteinart keinen merklichen Einfluß auf die Betonfestigkeit hatte. Der Festigkeitsverlust ist in erster Linie auf das Verdünnen des Klinkeranteils durch den Kalksteinzusatz beim PKZ zurückzuführen.

Wurden demgegenüber die PKZ bei gleichem Kalksteingehalt auf der Basis des feiner gemahlten PZ 45 F-A hergestellt, so war die



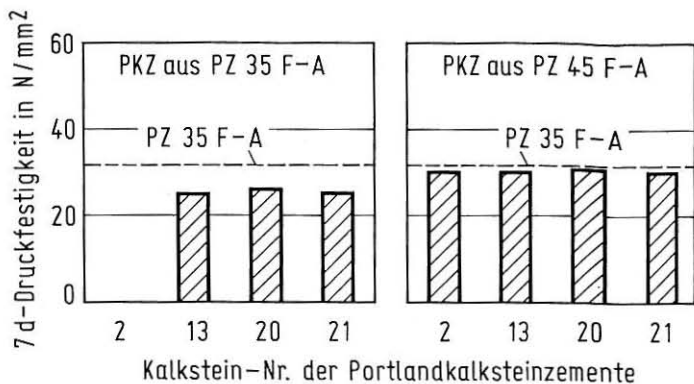


Bild 2 7-Tage-Druckfestigkeit einiger Betone mit PKZ

7-Tage-Druckfestigkeit des Betons nur noch geringfügig niedriger als die des Vergleichsbetons mit PZ 35 F — siehe rechter Teil von Bild 2. Daraus ist der Schluß zu ziehen, daß der Verlust an Frühfestigkeit praktisch vollständig durch eine höhere Mahlfineinheit des PZ-Anteils kompensiert werden kann. Ähnliche Feststellungen ergaben sich auch bei der Festigkeitsprüfung von Normmörtel mit denselben PKZ [2, 3].

Diese Relation trifft auch für die 28-Tage-Druckfestigkeit zu. Die Darstellung in Bild 3 zeigt, daß die 28-Tage-Druckfestigkeit der Betone mit PKZ, die auf der Basis von PZ 35 F-A hergestellt waren (linker Bildteil), noch um rd. 15% unter der des Vergleichsbetons mit PZ 35 F-A lag. Bei den Betonen mit PKZ auf der Basis von PZ 45 F-A erreichte die 28-Tage-Druckfestigkeit praktisch die des Vergleichsbetons mit PZ 35 F.

Durch eine Erhöhung des Kalksteingehalts von 15% auf 25% wurden sowohl die 7- als auch die 28-Tage-Druckfestigkeiten erwartungsgemäß weiter abgesenkt. Daraus geht insgesamt hervor, daß

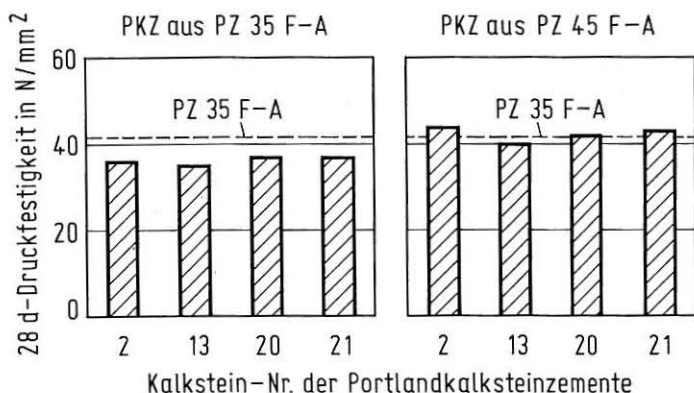


Bild 3 28-Tage-Druckfestigkeit einiger Betone mit PKZ

ein Festigkeitsverlust des Betons, der auf dem Verdünnungseffekt des Kalksteins beruht, innerhalb eines technisch und wirtschaftlich eng begrenzten Bereiches durch eine Erhöhung der Mahlfeinheit des Klinkeranteils ausgeglichen werden kann. Für Kalksteingehalte, die 20 Gew.-% im Zement überschreiten, dürfte dies nicht mehr ohne weiteres möglich sein.

Der Einfluß der Mahlfeinheit des Kalksteins im PKZ auf die Betondruckfestigkeit läßt sich am Beispiel des Kalksteins K 21 in Bild 4 zeigen. Der Kalksteingehalt wurde bei dieser Untersuchung mit 15% konstant gehalten. Bei Erhöhung der Mahlfeinheit des Kalksteins von 3000 auf 8000  $\text{cm}^2/\text{g}$  stieg im allgemeinen sowohl die 7- als auch die 28-Tage-Druckfestigkeit geringfügig an. Dies dürfte auf die bessere Ausfüllung des Lückenvolumens zurückzuführen sein. Ähnliche Ergebnisse zeigten die Untersuchungen an Normmörtel [2, 3]. Bei einer weiteren Steigerung der Mahlfeinheit auf 10000  $\text{cm}^2/\text{g}$  ging die Festigkeit wieder zurück. Es ist zu vermuten, daß bei dieser hohen Mahlfeinheit die Agglomeration feinsten Partikel im Betonmischer nicht aufgehoben wird. Durch diese Agglomeration können die Homogenität des Gefüges und damit die Festigkeit beeinträchtigt werden.

Der zum Vergleich ermittelte Einfluß anderer Zumahlstoffe auf die Betonfestigkeit, der nur orientierend überprüft wurde, geht aus Bild 5 hervor. Der linke Bildteil gibt die Ergebnisse der Prüfung mit zumahlstoffhaltigen Zementen auf der Basis des PZ 35 F-A, der rechte Bildteil die mit zumahlstoffhaltigen Zementen auf der Basis des PZ 45 F-A wieder. Es wurden Portlandkalksteinzemente mit Zementen, die jeweils 15 Gew.-% Flugasche, Quarz- oder Traßmehl enthielten, verglichen. Bei gleicher Mahlfeinheit der Zumahlstoffe von rd. 5000  $\text{cm}^2/\text{g}$  hatten die Betone aus Zementen mit Quarz- und Kalksteinmehl in etwa die gleiche 7- und 28-Tage-Druckfestigkeit. Der Beton mit Traßmehl hatte eine nur geringfügig höhere Festigkeit. Dies läßt auf eine verhältnismäßig geringe Puzzolanität dieses Traß-

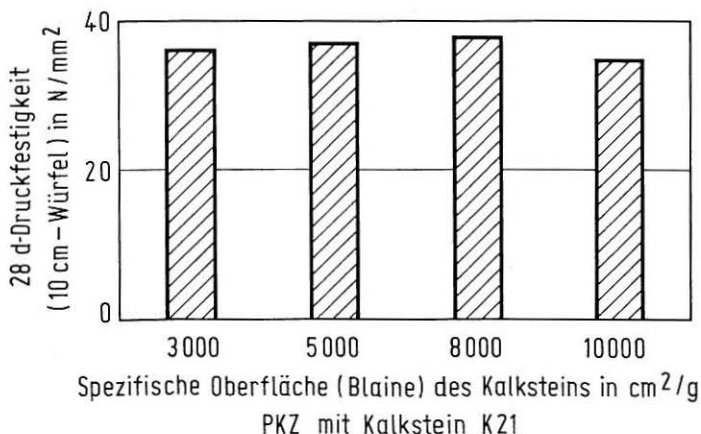


Bild 4 Einfluß der Mahlfeinheit des Kalksteins auf die 28-Tage-Druckfestigkeit

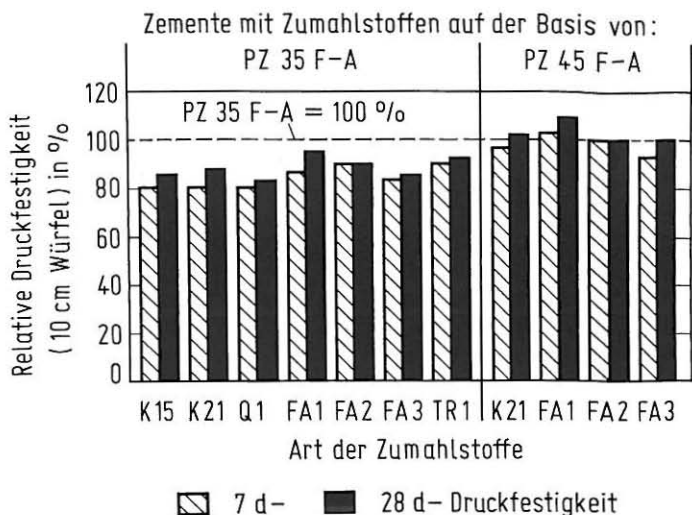


Bild 5 Einfluß unterschiedlicher Zumahlstoffe auf die Druckfestigkeit

mehls schließen. Die Festigkeit des Betons mit der Flugasche FA 1, einer besonders feinkörnigen Schmelzkammerasche mit einer spezifischen Oberfläche von  $5300 \text{ cm}^2/\text{g}$ , war dagegen deutlich höher. Die Festigkeit der Betone mit den beiden anderen gröberen Flugaschen FA 2 und FA 3, die, wie in der Bundesrepublik häufig anzutreffen, eine Feinheit von nur  $3200$  bzw.  $3700 \text{ cm}^2/\text{g}$  aufwiesen, war nach 7 und 28 Tagen gleich oder nur geringfügig größer als die der Betone mit PKZ.

Die im rechten Teil des Bildes 5 dargestellten Druckfestigkeiten der Betone mit Zumahlzementen auf der Basis des PZ 45 F-A machen deutlich, daß durch eine feinere Mahlung des Klinkeranteils die Druckfestigkeit auch der Betone mit Zementen, die die gröbere Flugasche FA 2 oder FA 3 enthielten, auf das gleiche Niveau gebracht wurde wie das des Betons mit dem PZ 35 F-A.

### 5.2.2 Carbonatisierung

Der Carbonatisierungsfortschritt wurde an Mörtelprismen bestimmt, die sieben Tage feucht nachbehandelt waren. Die Carbonatisierungstiefe in Abhängigkeit von der Zeit und von den verwendeten Ausgangszementen PZ 35 F-A oder PZ 45 F-A geht aus Tafel 2 hervor. Der Zusatz von 15 Gew.-% Kalksteinmehl zum Zement hatte generell eine im Vergleich zum jeweiligen PZ-Mörtel höhere Carbonatisierungstiefe zur Folge. Durch eine höhere Mahlfineinheit der Portlandzementkomponente konnte jedoch dieser Einfluß kompensiert werden. Aus den Untersuchungsergebnissen ist ersichtlich, daß der PKZ-Mörtel auf der Basis des PZ 45 F-A die gleiche Carbonatisierungstiefe aufwies wie der Mörtel aus PZ 35 F-A. Die Kalksteinart und die Mahlfineinheit des Kalksteins hatten keinen nennenswerten Einfluß auf den Carbonatisierungsfortschritt [2].

Tafel 2 Zunahme der Carbonatisierungstiefe in Abhängigkeit von der Zeit für Mörtel mit PZ und PKZ

| Zement                            | Carbonatisierungstiefe in mm<br>nach |             |             |              |             |             |
|-----------------------------------|--------------------------------------|-------------|-------------|--------------|-------------|-------------|
|                                   | 14<br>Tagen                          | 28<br>Tagen | 70<br>Tagen | 180<br>Tagen | 1<br>Jahren | 3<br>Jahren |
| PZ 35 F-A                         | 0,5                                  | 1,0         | 1,5         | 2,0          | 3,0         | 5,0         |
| Gemisch PZ 35 F-<br>Kalkstein K13 | 0,5                                  | 1,0         | 1,5         | 3,0          | 3,5         | 6,5         |
| PZ 45 F-A                         | 0,5                                  | 0,5         | 1,0         | 1,5          | 2,0         | 3,0         |
| Gemisch PZ 45 F-<br>Kalkstein K13 | 0,5                                  | 0,5         | 1,0         | 1,5          | 2,5         | 5,0         |

### 5.2.3 Frostwiderstand

Da Normprismen in allen Gegenden Deutschlands und zum Teil auch in Europa mit derselben Zusammensetzung und demselben Sand hergestellt werden, wäre es wünschenswert und vorteilhaft, an diesen Prismen neben der Festigkeit auch den Einfluß des Zements auf den Frostwiderstand zu prüfen. Deshalb wurden bei dieser Untersuchung Normprismen  $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$  auch in die Frostprüfung einbezogen. In der Tendenz ergaben sich ähnliche Ergebnisse wie bei der Prüfung mit dem Würfelverfahren [2]. Allerdings war das Streumaß der Versuchsergebnisse größer. Aus diesem Grund wurde die letzliche Beurteilung, welchen Einfluß die Zusammensetzung der Zemente auf den Frostwiderstand des Betons hat, anhand des Würfelverfahrens vorgenommen.

#### 5.2.3.1 Vorlagerungsdauer und -art

Bei dem Würfelverfahren wurden als Zeitpunkte für den Prüfbeginn 28 und 56 Tage gewählt. Somit dauerte die Trockenlagerung im Klimaraum mit  $20^\circ\text{C}/65\%$  rel. Feuchte 20 bzw. 48 Tage. Die Ergebnisse der Frostprüfung bei unterschiedlichem Prüfbeginn unterschieden sich im Rahmen der bei einer Frostprüfung unvermeidlichen Streuungen nicht signifikant voneinander [2]. Zur weiteren Bewertung der Zemente wurden deshalb — wie auch bei der Zulassungsprüfung für Portlandkalksteinzement — nur die Ergebnisse der Prüfung mit Prüfbeginn im Alter von 28 Tagen berücksichtigt.

Ein Einfluß der unterschiedlichen Vorlagerung der Würfel bei 65% rel. Luftfeuchtigkeit und bei 80% rel. Luftfeuchtigkeit auf den Frostwiderstand des Betons ließ sich anhand der Prüfungen an acht unterschiedlichen Betonen nicht erkennen.

#### 5.2.3.2 Kalksteinart

Der Gewichtsverlust bei den Portlandzementen nach 100 Frost-Tau-Wechseln lag zwischen 1,4 und 5,2%. Betone aus PKZ mit 15 Gew.-% Kalkstein einer Mahlfineinheit von rd.  $5500 \text{ cm}^2/\text{g}$  hatten einen Gewichtsverlust zwischen 2,3 und 18,6%. Dabei hatte die Kalksteinart auf den Frostwiderstand der Betone mit Portlandkalksteinzementen einen erheblichen Einfluß. Der Zusatz von 15% Kalksteinmehl verminderte zwar den Frostwiderstand der Betone generell ge-

genüber den Betonen mit PZ 35 F, der Gewichtsverlust blieb jedoch für eine Reihe von Kalksteinen unter der Grenze von 10 Gew.-%. Der Gewichtsverlust ist ein Maß für den Frostwiderstand. Er sollte bei Beton mit hohem Frostwiderstand 10% nicht überschreiten. Bei den Untersuchungen überschritten Betone aus Portlandkalksteinzement mit den Kalksteinen K 1, K 2, K 13, K 16, K 20, K 25 diese Grenze z. T. erheblich. Für die Herstellung von Portlandkalksteinzementen sind daher diese Kalksteine nicht geeignet.

Im Hinblick auf die Praxis galt es herauszufinden, inwieweit die chemischen und mineralogischen Eigenschaftsmerkmale der Kalksteine die Dauerhaftigkeit der Betone beeinträchtigen. Bei grundlegenden Untersuchungen zahlreicher Parameter zeigte sich, daß

- der Calciumcarbonatgehalt ( $\text{CaCO}_3\text{-CEN}$ ),
- die Methylenblau-Adsorption und
- der Gehalt an organischen Bestandteilen (TOC)

als Kriterien geeignet sind, um den Einfluß des Kalksteins auf den Frostwiderstand des Betons aus PKZ zu beurteilen.

#### Calciumcarbonatgehalt

Bild 6, in dem nur Ergebnisse von Betonen mit PKZ enthalten sind, deren Kalksteine die beiden Anforderungen hinsichtlich des Methylenblau-Wertes und TOC-Gehaltes erfüllen, gibt die Abhängigkeit des Gewichtsverlustes der Betone beim Würfelverfahren vom Calciumcarbonatgehalt ( $\text{CaCO}_3\text{-CEN}$ ) des Kalksteins der PKZ wieder. Eine ausgeprägte Korrelation zwischen Gewichtsverlust und dem  $\text{CaCO}_3$ -Gehalt des Kalksteins liegt zwar nicht vor, ab einem  $\text{CaCO}_3$ -Gehalt von 75% weisen jedoch die mit PKZ hergestellten Betone im allgemeinen einen ausreichenden Frostwiderstand auf. Bei der einzigen Ausnahme hiervon handelte es sich um den Kalkstein K 20, der bei einem  $\text{CaCO}_3$ -Gehalt von 79 Gew.-% einen Ge-

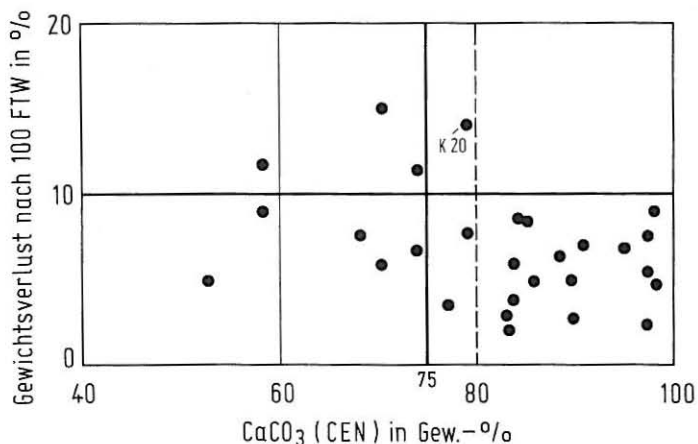


Bild 6 Gewichtsverlust von Beton mit PKZ nach 100 Frost-Tau-Wechseln in Abhängigkeit von dem  $\text{CaCO}_3$ -Gehalt, der zur Herstellung des PKZ verwendeten Kalksteine

wichtsverlust von 14% aufwies. Schon bei einer Anhebung der Grenze für den  $\text{CaCO}_3$ -Gehalt auf 80% würde auch der Kalkstein K 20 ausgeschlossen werden. Daß Betone mit Kalkstein, deren  $\text{CaCO}_3$ -Gehalt 75 Gew.-% unterschreitet, in einigen Fällen einen nicht ausreichenden und in einigen Fällen einen ausreichenden Frostwiderstand aufweisen, dürfte u. a. auf die Nebenbestandteile des Kalksteins, wie z. B. die Tonminerale, zurückzuführen sein. Der Calciumcarbonatgehalt sollte deshalb auf keinen Fall 75 Gew.-%, besser sogar 80 Gew.-%, nicht unterschreiten.

#### Methylenblau-Adsorption

Durch eine Beurteilung des Kalksteins mit dem Methylenblau-Wert können indirekt die Tonmineralart und der Tonmineralgehalt erfaßt werden [2, 3, 13]. Bild 7, in dem nur Meßwerte von Betonen mit Portlandkalksteinzementen enthalten sind, deren Kalksteine die beiden Anforderungen hinsichtlich  $\text{CaCO}_3$ -Gehaltes und TOC-Gehaltes erfüllen, gibt die Abhängigkeit des Frostwiderstandes des Betons vom Methylenblau-Wert des Gekalksteins wieder. Eine ausgeprägte Korrelation liegt auch hier nicht vor. Es geht jedoch aus dem Bild hervor, daß ein Beton mit einem Kalkstein, der den Methylenblau-Wert von 1,2 Gew.-% einhält oder unterschreitet, auch einen ausreichenden Frostwiderstand (Gewichtsverlust  $\leq 10\%$ ) aufweist. Diese Grenze sollte aus Sicherheitsgründen nicht überschritten werden, auch wenn im Einzelfall ein Kalkstein mit erhöhter Methylenblau-Adsorption den Frostwiderstand eines PKZ-Betons nicht beeinträchtigt.

#### TOC

Betone aus PKZ mit Kalkstein, die die Grenzen für den  $\text{CaCO}_3$ -Gehalt und für den Methylenblau-Wert einhielten, hatten im allgemeinen einen ausreichenden Frostwiderstand. Mit diesen beiden

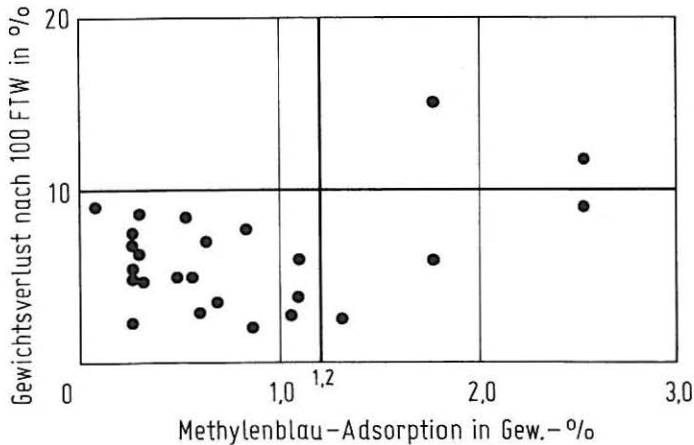


Bild 7 Gewichtsverlust von Beton mit PKZ nach 100 Frost-Tau-Wechseln in Abhängigkeit von dem Methylenblau-Wert der zur Herstellung des PKZ verwendeten Kalksteine

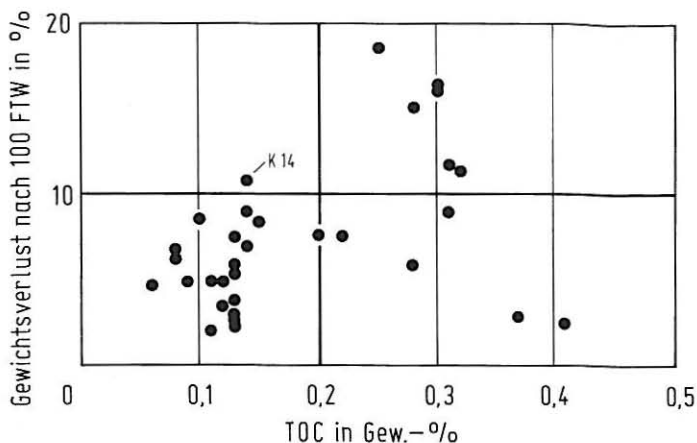


Bild 8 Gewichtsverlust von Beton mit PKZ nach 100 Frost-Tau-Wechseln in Abhängigkeit von dem TOC-Gehalt der zur Herstellung der PKZ verwendeten Kalksteine

Kriterien wurde jedoch nicht der unzureichende Frostwiderstand der Betone erfaßt, die Zemente mit den Kalksteinen K 13 und K 16 enthielten. Die Überprüfung des Gefüges dieser Kalksteine hat ergeben, daß sie einige poröse Partikel enthielten, die durch ihr Wassersaugvermögen vermutlich zu einem geringen Frostwiderstand des Betons beitragen. Eine quantitative Bestimmung dieser Partikel oder eine Zuordnung zur Frostwiderstandsfähigkeit war nicht möglich. Als indirekter Indikator hierfür erwies sich der Gehalt an organischer Substanz (TOC) [2, 3, 12], der bei den Kalksteinen K 13 und K 16 auffällig hoch war. Bild 8 verdeutlicht, daß auch zwischen TOC-Gehalt und Frostwiderstand keine ausgeprägte Korrelation besteht, daß aber bei einem TOC-Gehalt von  $\leq 0,2$  Gew.-% die Frostabwitterung der Betone einen Wert von 10 Gew.-% mit einer Ausnahme (K 14), die möglicherweise auf die Streuung des Prüfverfahrens zurückzuführen ist, nicht überschritt. In den Entwurf der Norm ENV 197 wurde deshalb die Begrenzung des TOC-Gehaltes auf  $\leq 0,2$  Gew.-% übernommen.

#### Mahlfeinheit

Während im allgemeinen eine Erhöhung der Mahlfeinheit keinen signifikanten Einfluß auf den Frostwiderstand hatte, wirkte sich die Erhöhung der Mahlfeinheit der oben erwähnten Kalksteine K 13 und K 16 auf deutlich über  $3000 \text{ cm}^2/\text{g}$  nachteilig auf den Frostwiderstand aus. Bild 9 zeigt den Anstieg des Gewichtsverlustes der Betone mit dem PKZ, der 15 Gew.-% Kalkstein K 16 enthielt, von rd. 12 auf rd. 24%, wenn die Mahlfeinheit von  $3000 \text{ cm}^2$  auf  $10000 \text{ cm}^2/\text{g}$  angehoben wurde. Es wurde zunächst vermutet, daß die in diesem Kalkstein enthaltenen schwammartigen porösen Gebilde durch das Feinmahlen zerstört werden und daher keinen Einfluß mehr auf den Frostwiderstand haben.

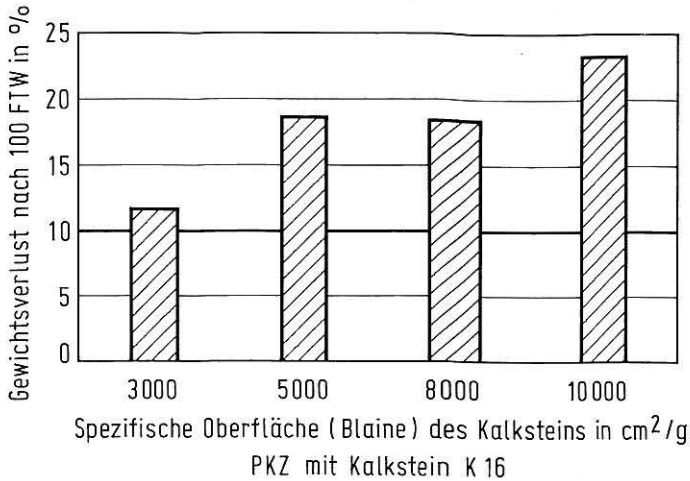


Bild 9 Einfluß der Mahlfeinheit des Kalksteins K 16 auf den Frostwiderstand des Betons

Entgegen dieser Annahme stellte sich jedoch in Übereinstimmung mit den Gefügeuntersuchungen heraus, daß erst durch die höhere Mahlfeinheit zusätzliche poröse Partikel freigelegt werden, die dann nach starkem Wassersaugen zur Frostschädigung beitragen können [2, 3].

### 5.2.3.3 Klinkerart und Kalksteingehalt

Werden Portlandzemente der gleichen Festigkeitsklasse, die aus Klinkern unterschiedlicher Zusammensetzung ermahlen worden waren, zusammen mit gleichem Kalkstein zur Herstellung des PKZ eingesetzt, so ergab sich kein signifikanter Einfluß auf den Frostwiderstand. Der Einsatz eines PZ 45 F zur Herstellung der PKZ brachte, wie erwartet, wegen der höheren Dichte und der höheren Festigkeit bei Beginn der Frostrprüfung eine Verbesserung des Frostwiderstandes der Betone, die dann bei geeigneten Kalksteinen denselben Frostwiderstand aufwiesen wie ein Beton mit PZ 35 F ohne Kalkstein.

Die merkliche Verringerung des Frostwiderstandes durch Erhöhung des Kalksteingehaltes im PKZ von 15 auf 25 Gew.-% konnte dagegen, wie Bild 10 zeigt, nicht vollständig durch eine Erhöhung der Mahlfeinheit des Portlandzementklinkers ausgeglichen werden. Für die Beurteilung ist zusätzlich zu berücksichtigen, daß der PKZ mit 25% Kalkstein auf der Basis des PZ 45 F die gleiche Festigkeit aufwies wie der PKZ mit 15 Gew.-% des gleichen Kalksteins auf der Basis des PZ 35 F.

### 5.2.3.4 Quarz-, Traß- und Flugasche

Betone mit Zementen, die zum Vergleich 15 Gew.-% Quarz- oder Traßmehl oder Steinkohlenflugasche enthielten, wiesen etwa den



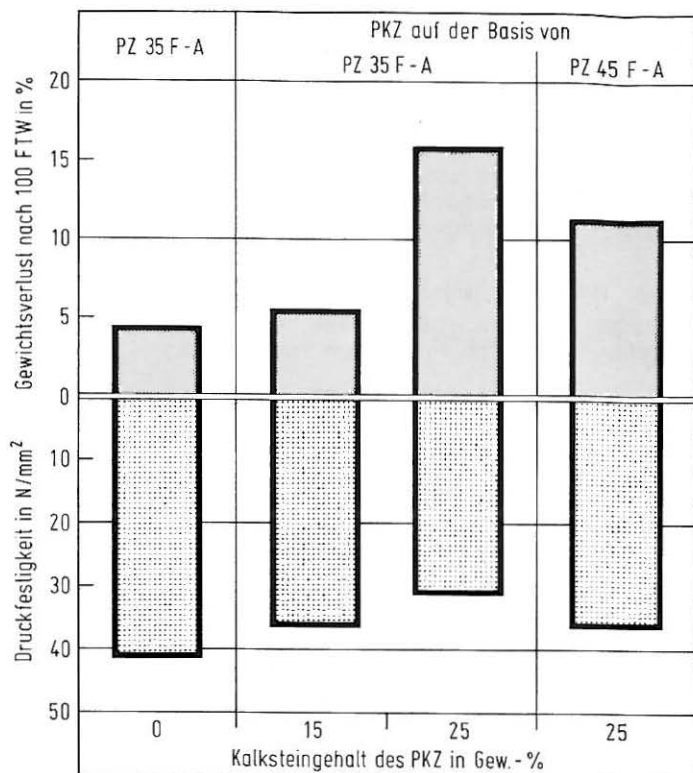


Bild 10 Einfluß des Kalksteingehaltes von PKZ auf den Frostwiderstand und die Festigkeit des Betons

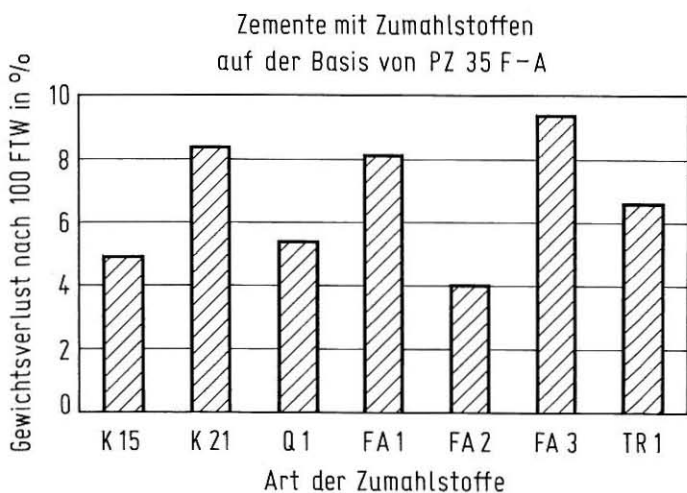


Bild 11 Einfluß unterschiedlicher Zumahlstoffe im Zement auf den Frostwiderstand des Betons

gleichen Gewichtsverlust auf wie die Betone mit verschiedenen PKZ und gleich hohem Kalksteingehalt, wenn die Kalksteine den Beurteilungskriterien für die Verwendbarkeit (siehe Abschn. 5.2.3.2) entsprachen. Die Versuchsergebnisse sind in Bild 11 dargestellt. Bei den Zementen mit Steinkohlenflugaschen hatte der Beton mit Flugasche FA1, der die höchste Festigkeit aufwies, aber nicht gleichzeitig auch den größten Frostwiderstand. Dem Einfluß unterschiedlicher Flugascheeigenschaften wurde in diesem Zusammenhang nicht weiter nachgegangen.

### 5.2.3.5 Werkmäßig hergestellte PKZ

In Bild 12 ist für Beton mit werkmäßig hergestellten Zementen der Gewichtsverlust bei der Prüfung des Frostwiderstandes nach dem

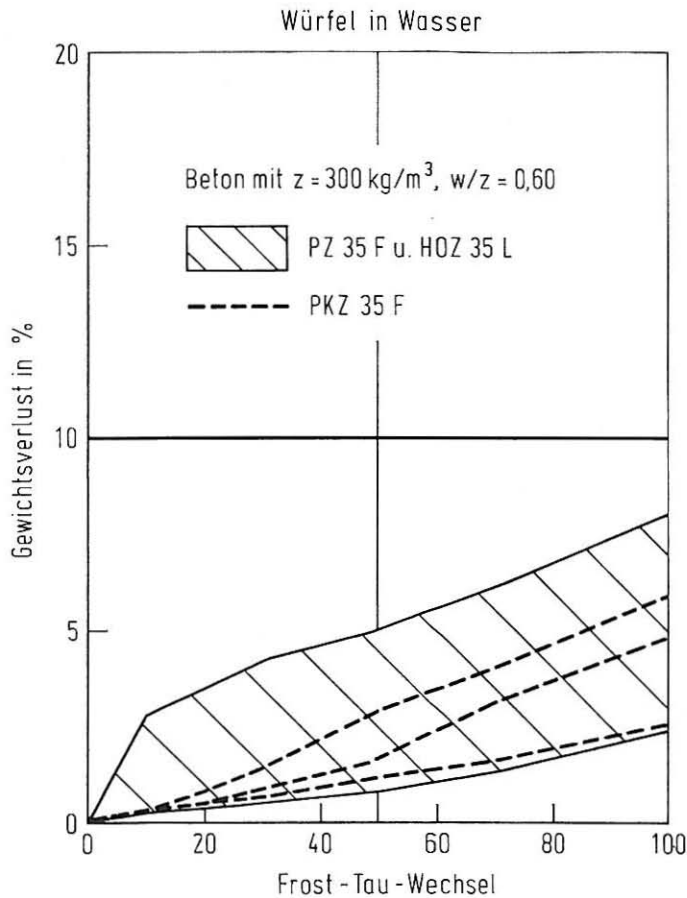


Bild 12 Frost-Widerstand (Gewichtsverlust) von Beton mit PKZ bei der Prüfung mit dem Würfelverfahren im Vergleich zu Betonen mit PZ 35 F und HOZ 35 L

Würfelverfahren (Einfrieren unter Wasser) in Abhängigkeit von der Anzahl der Frost-Tau-Wechsel aufgetragen. Es zeigte sich, daß nach 100 Frost-Tau-Wechseln der Gewichtsverlust bei Betonen mit werkmäßig hergestellten PKZ 35 F ebenso unter 10% lag wie bei in der Praxis erprobten Betonen mit PZ 35 F und HOZ 35 L. Bild 13 gibt den Gewichtsverlust in Abhängigkeit von der Anzahl der Frost-Tau-Wechsel für die Frost-Tausalz-Prüfung (Einfrieren und Auftauen in 3%iger NaCl-Lösung) wieder. Betone mit hohem Frost-Tausalz-Widerstand haben bei dieser Prüfung einen Gewichtsverlust nach 100 Frost-Tau-Wechseln von höchstens 5% [15]. Wie Bild 13 zeigt, wird diese Grenze nur von Luftporenbetonen eingehalten. Diese Anforderung erfüllt auch der Luftporenbeton mit PKZ 35 F und einem ausreichenden auf die Feinmörtelmenge abgestimmten Mikroluftporengehalt. Dieser PKZ 35 F kann deshalb auch für Beto-

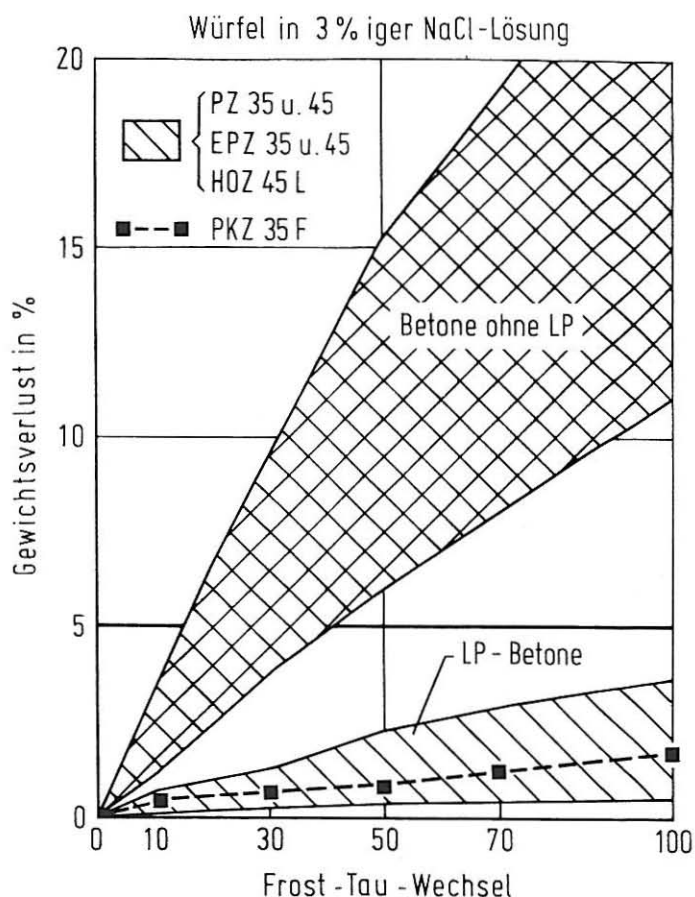


Bild 13 Frost-Tausalz-Widerstand (Gewichtsverlust) von Luftporenbeton mit PKZ im Vergleich zu Luftporenbetonen mit anderen Zementen

ne, die einem sehr starken Frost-Tausalz-Angriff, wie z. B. bei Betonfahrbahnen, widerstehen müssen, eingesetzt werden.

## 6 Zusammenfassung

Im Forschungsinstitut der Zementindustrie wurden mit finanzieller Unterstützung der Arbeitsgemeinschaft Industrieller Forschungsvereinigungen (AIF) Untersuchungen durchgeführt, um Beurteilungskriterien für die Eignung von Kalkstein zur Herstellung von Portlandkalksteinzement zu definieren. Hierfür wurden Kalksteine unterschiedlicher geologischer Herkunft aus Deutschland, Frankreich, Österreich und der Schweiz untersucht. Mit 29 dieser Kalksteine wurden Portlandkalksteinzemente hergestellt und die Frisch- und Festbetoneigenschaften, insbesondere die Dauerhaftigkeit der damit hergestellten Betone, geprüft. Die Untersuchungen führten zusammengefaßt zu den nachfolgenden Ergebnissen.

6.1 Betone mit PKZ hatten im allgemeinen eine etwas weichere Konsistenz als vergleichbare Betone mit Portlandzement.

6.2 Um bei Beton aus PKZ mit 15 Gew.-% Kalkstein die gleiche Druckfestigkeit wie mit PZ 35 F erzielen zu können, muß die Mahlfeinheit des Klinkeranteils angehoben werden und in etwa der eines PZ 45 F entsprechen.

6.3 Bei sonst gleicher Zusammensetzung beeinflusst eine zunehmende Mahlfeinheit des Kalksteinanteils im PKZ die Druckfestigkeit des Betons nur in recht begrenztem Maße.

6.4 Bei gleicher Normdruckfestigkeit der Mörtel aus PKZ bzw. PZ war der Carbonatisierungsfortschritt in etwa gleich groß.

6.5 Kalkstein, der für die Herstellung von Portlandkalksteinzement verwendet werden soll, muß folgende Anforderungen erfüllen:

- $\text{CaCO}_3(\text{CEN})$ -Gehalt  $\geq 75$  Gew.-%
- TOC-Gehalt  $\leq 0,20$  Gew.-%,
- Methylenblau-Wert  $\leq 1,2$  Gew.-%.

Wurden diese Grenzwerte für den Kalkstein eingehalten, so hatten die Betone mit PKZ im allgemeinen einen ausreichend hohen Frostwiderstand. Eine Anhebung des Mindestgehaltes an  $\text{CaCO}_3$  im Kalkstein auf 80 Gew.-% würde die Sicherheit gegenüber einer Frostschädigung eines Betons mit PKZ erhöhen.

6.6 Betone mit PKZ, dessen Kalkstein die obengenannten Kriterien erfüllte, hatten in etwa den gleichen Frostwiderstand wie Beton mit PZ, wenn sich die Normfestigkeit der Zemente nicht wesentlich voneinander unterschieden.

6.7 Die Prüfung des Frost-Tausalz-Widerstands eines Betons, der einen werkmäßig hergestellten PKZ enthielt, hat gezeigt, daß dieser Beton einen hohen Widerstand gegen einen sehr starken Frost-Tausalz-Angriff aufwies.

6.8 Um eine vergleichbare gute Dauerhaftigkeit mit Betonen aus PZ zu erzielen, sollte der Kalksteingehalt des PKZ 20 Gew.-% nicht überschreiten. Werden PKZ mit höheren Kalksteingehalten hergestellt, so muß die Eignung dieses PKZ durch Prüfung des Frostwiderstands von Beton nachgewiesen werden.

## SCHRIFTTUM

- [1] ENV 197 (Entwurf 1989): Zement-Zusammensetzung, Anforderungen und Konformitätskriterien
- [2] Sprung, S., und E. Siebel: Eignung von Kalkstein als Zuschlagstoff für die Zementherstellung. Verein Deutscher Zementwerke — Forschungsinstitut der Zementindustrie: Forschungsbericht Nr. 10 „Aus der Forschung — Für die Praxis“, 1990
- [3] Sprung, S., und E. Siebel: Beurteilung der Eignung von Kalkstein zur Herstellung von Portlandkalkzement (PKZ). Zement-Kalk-Gips 44 (1991) H. 1, S. 1/11
- [4] Wischers, G.: Festigkeit und Dauerhaftigkeit als Kriterium für die Entwicklung neuer Zementarten. Fortschritte im konstruktiven Ingenieurbau, Ernst und Sohn — Verlag für Architektur und techn. Wissenschaft, Berlin 1984, S. 257/265
- [5] Juyot, R., und R. Ranc: Controlling the properties of concrete through the choice and quality of cements with limestone additions. Intern. Conf. on the Utilization of Fly Ash, Silica Fume, Slags and other By-Products in Concrete, Montebello, Canada, 1983
- [6] Baron, J., und C. Douvre: Technical and economical aspects of the use of limestone filler additions in cement. World Cem. 18 (1987) No. 3, S. 100/104
- [7] Krell, J., und G. Wischers: Einfluß der Feinstoffe im Beton auf Konsistenz, Festigkeit und Dauerhaftigkeit. beton 38 (1988) H. 9, S. 356/359 und H. 10, S. 401/404; ebenso Betontechnische Berichte 1986-1988, Beton-Verlag, Düsseldorf 1989, S. 175/198
- [8] Albeck, J. und B. Sutej: Neue Zemente — Eigenschaften von Betonen aus Portlandkalkzement. Beton 41 (1991) H. 5 u. 6 (in Vorbereitung)
- [9] Wischers, G.: „Leistungsfähigkeit“ als Kriterium für die Normung von Zement und Beton. Betonwerk + Fertigteil-Technik BFT (1990) H. 3, S. 51/60
- [10] Siebel, E.: Laboratory investigations of the frost resistance of concrete and their correlation with field performance. In: Rilem seminar on the durability of concrete structures under normal outdoor exposure. Hannover (March 1984)
- [11] Prüfung von Beton-Empfehlungen und Hinweise als Ergänzung zu DIN 1048. Deutscher Ausschuß für Stahlbeton. Heft ... (in Vorbereitung)
- [12] CEN TC 51-Working-Group 6: Procedure for the determination of total organic carbon content (TOC) in limestone. Zement-Kalk-Gips 43 (1990) H. 8, S. 409/412
- [13] Granulates — Essai au Bleu de Méthylène, Französische Norm P — 18-592, 1980
- [14] Grube, H., und J. Krell: Zur Bestimmung der Carbonatisierungstiefe von Mörtel und Beton. beton 36 (1986) H. 3, S. 104/108; ebenso Betontechnische Berichte 1986 — 88, Beton-Verlag, Düsseldorf 1989, S. 21/31
- [15] Bonzel, J., und E. Siebel: Neuere Untersuchungen über den Frost-Tausalz-Widerstand von Beton. beton 27 (1977) H. 4, S. 153/157, H. 5, S. 205/211, und H. 6, S. 237/244; ebenso Betontechnische Berichte 1977, Beton-Verlag, Düsseldorf 1978, S. 55/104