

# Kurzfristige Festigkeitsprüfung zur Güteüberwachung des Betons

Von Kurt Walz und Jürgen Dahms, Düsseldorf

## Übersicht

Durch die Güteprüfung nach DIN 1048 ist mit 20 cm-Würfeln, die aus dem Baustellenbeton während des Betonierens hergestellt werden, nachzuweisen, daß die verlangte Betongüte nach 28 Tagen vorhanden ist. Der Nachweis liegt also erst vor, nachdem schon sehr viel Beton eingebaut oder nachdem das Bauwerk fertiggestellt und keine Korrektur mehr möglich ist.

Ausgehend von früheren, an anderen Stellen durchgeführten Arbeiten wurde hier untersucht, inwieweit man von einer durch verschiedene Wärmebehandlungen erhaltenen Frühfestigkeit  $W$  auf die für den Gütenachweis maßgebende 28 Tage-Druckfestigkeit  $B$  schließen kann. In die Versuche wurden ein Portlandzement und ein Hochofenzement sowie sechs verschiedene Betonmischungen einbezogen (Zementgehalte 250 bis 360 kg/m<sup>3</sup>, Wassercementwerte 0,45 bis 0,70 und steife, weiche sowie flüssige Konsistenz). Zur Erlangung der Frühfestigkeit wurden frisch gefüllte 10 cm-Würfelformen einer 6stündigen Kochbehandlung oder Warmluftbehandlung unterzogen. Die dann im Alter von 1 Tag ermittelte Würfeldruckfestigkeit  $W$  wurde zu der nach 28 Tagen am 20 cm-Würfel festgestellten ins Verhältnis gesetzt. Bei 4- bis 6maliger Wiederholung der Prüfung gleicher Mischungen wurde gefunden, daß mit beiden Wärmebehandlungen (Kochbehandlung und Warmluftbehandlung) wenig streuende Frühfestigkeiten erhalten werden. Eine niedere (hohe) 28 Tage-Druckfestigkeit  $B$  drückt sich auch in einer entsprechend niederen (hohen) Frühfestigkeit aus. Dabei bleibt der für eine bestimmte Mischung vorausbestimmte Verhältniswert  $W : B$  im Bereich der im allgemeinen anzunehmenden Schwankungen der Zusammensetzung des verwendeten Zements oder der Betonmischung unverändert.

Die Verhältniswerte  $W : B$  fanden sich für die hier untersuchten, sehr verschieden zusammengesetzten Mischungen mit entsprechend unterschiedlichen Druckfestigkeiten beim Beton aus dem Portlandzement bei Warmluftbehandlung zwischen 0,44 (0,37) und 0,54 (Mittel 0,46) und beim Beton aus dem Hochofenzement zwischen 0,76 und 0,83 (Mittel 0,80).

Wird also bei einer vorausgehenden Eignungsprüfung eines Betons neben der 28 Tage-Druckfestigkeit  $B$  auch die zugehörige Frühfestigkeit  $W$  bestimmt, so kann für den Baustellenbeton aus dem Verhältnis  $W : B$  bereits nach 1 Tag oder noch früher errechnet werden, welche 28 Tage-Druckfestigkeit etwa zu erwarten ist.

Für das Baustellenlaboratorium erscheint die Warmluftbehandlung  $W$  im Wärmeschrank in der Handhabung etwas einfacher als die Kochbehandlung.

## 1. Einleitung

Nach DIN 1045 und DIN 1048 ist durch eine Güteprüfung des Baustellenbetons die Druckfestigkeit der Mischung nachzuweisen. Dabei werden in der Regel 20 cm-Würfel nach 28 Tagen geprüft; sie lagern bei 15 bis 22 °C (Normallagerung).

Man erhält mit diesem Nachweis also erst nach 28 Tagen Aufschluß darüber, ob mit der bei der Eignungsprüfung festgelegten Betonzusammensetzung die geforderte Betongüte der Mischung auf der Baustelle erreicht worden ist.

Wäre es möglich, bereits nach wenigen Stunden oder spätestens nach 1 Tag einen Aufschluß über die zu erwartende maßgebende Betongüte nach 28 Tagen zu erhalten, so könnte die Mischung für das weitere Betonieren nötigenfalls auf die verlangte Betongüte noch besser abgestimmt werden.

## 2. Frühere Untersuchungen

Es fehlte daher nicht an Versuchen, die bei normaler Lagerung in höherem Alter zu erwartende Festigkeit des Betons über eine durch Erwärmen erhaltene Frühfestigkeit zu beurteilen. Im folgenden werden zunächst vorausgegangene Arbeiten, die sich mit dieser Frage befaßten, kurz besprochen.

Über den Einfluß der Zementzusammensetzung auf die Frühfestigkeit nach Erhärten bei einer Temperatur von 100 °C geben Versuche von P. H. Bates und R. L. Blaine aus dem Jahre 1932 mit 4 in ihrer chemischen und mineralogischen Zusammensetzung sehr eingehend definierten Portlandzementen Aufschluß [1]. Die Formen für die Mörtelwürfel und Zugkörper wurden nach einer halben Stunde mit einer Glasplatte abgedeckt, 16 h in Wasser gekocht oder über kochendem Wasser erhitzt. Prüfungen fanden u. a. schon nach 24 h statt und konnten mit der 28 Tage-Festigkeit nach Normallagerung verglichen werden. Die Verhältniswerte zwischen beiden Druckfestigkeiten lagen, abhängig vom Zement, nach dem Kochen zwischen 0,36 und 0,54 und nach dem Erhitzen über dem Wasserbad zwischen 0,36 und 0,73.

Besonderes Interesse verdienen die sehr umfassenden Untersuchungen der EMPA [2] zur kurzfristigen Voraussage der Festigkeitsentwicklung von Portlandzementen verschiedener Herkunft und Lieferung (reine Portlandzemente und Portlandzemente mit 5% Hüttensand). Die normgemäßen Prismen wurden nach 24stündiger Normallagerung einer Dampfdruckhärtung im Autoklav (3 h bei 12 at; etwa 187 °C) ausgesetzt. Die ganze Dampfbehandlung nahm 9 h in Anspruch. Ein Prüfergebnis steht nach diesem Verfahren also nach 33 h zur Verfügung. Das Ziel dieser Arbeit war, u. a. festzustellen, ob mit dieser Behandlung möglichst gleiche Frühfestigkeit und 28 Tage-Normendruckfestigkeit des Zements zu erhalten sind. Das Verhältnis der beiden Festigkeiten fand sich überwiegend zwischen 0,9 und 1,1. Dabei ist zu berücksichtigen, daß bei der Erhärtung im gespannten Dampf nicht nur ein Teil der Klinkerphasen anders mit dem Wasser reagiert als bei normaler Erhärtung, sondern daß auch Sekundärreaktionen zwischen Sand und den Reaktionsprodukten des Zements (Calciumhydroxyd) stattfinden. Das Ergebnis von mehreren hundert Prüfungen mit verschiedenen Zementen besagt, daß die so entwickelte Frühfestigkeit für die Gesamtheit der Zemente

in verhältnismäßig engen Grenzen mit der 28 Tage-Normen-druckfestigkeit (Schweizer Norm) übereinstimmt, daß also eine unterschiedliche Zementzusammensetzung sich auf die Frühfestigkeit hier nicht anders auswirkte als auf die Normenfestigkeit. Dabei ist allerdings zu erwähnen, daß die chemische und mineralogische Zusammensetzung der Zemente nicht aufgeführt ist und es möglich ist, daß sich die verschiedenen Portlandzemente im Gehalt an einzelnen Klinkerphasen nur wenig unterscheiden und daß sich der Gehalt von 5% Hüttensand auch nicht besonders auswirkte.

Hierfür sprechen auch die Untersuchungen von F. Keil und A. Narjes [3], die an Modellklinkern, die praktisch den gesamten Bereich der technischen Portlandzemente umfaßten, eine Abhängigkeit des Verhältnisses Frühfestigkeit durch Dampfbehandlung zu 28 Tage-Festigkeit bei Normallagerung von der mineralogischen Zusammensetzung der Klinker fanden. Gleichermäßen kommen F. Keil und H. Mathieu [4] zu dem Schluß, daß wegen des unterschiedlichen Ansprechens der verschiedenen Zemente auf eine Wärmebehandlung durch die ausschließliche Schnellprüfung mit Erwärmen, Kochen oder Dampfhärten nicht zuverlässig genug auf die 28 Tage-Normenfestigkeit geschlossen werden kann.

Wenn es sich bei den zuvor genannten Arbeiten um Zementuntersuchungen handelte, so zeichnet sich bei den vor einigen Jahren im Road Research Laboratory in Harmondsworth (England) durchgeführten Untersuchungen [5] und den vorausgegangenen Versuchen von J. W. H. King [6] bereits ein brauchbares Verfahren für die frühzeitige Beurteilung der *Druckfestigkeit des Betons* zur Güteüberwachung auf der Baustelle ab. Hierbei wurden die gefüllten, mit einer Stahlplatte abgedeckten 15 cm-Würfelformen in einem Wärmeschrank 5 h lang bei 85 °C erwärmt. Das vorausgehende Anheizen dauerte 1 h und das Abkühlen  $\frac{1}{2}$  h, so daß bereits rd. 7 h nach dem Mischen auf Druckfestigkeit geprüft werden konnte. Für die beiden untersuchten Baustellenbetone wurden verhältnismäßig wenig streuende Beziehungen zwischen Frühfestigkeit und 28 Tage-Festigkeit gefunden (z. B. entsprach bei einem der Betone die Frühfestigkeit von 100 kp/cm<sup>2</sup> einer mittleren Druckfestigkeit nach 28 Tagen von 300 kp/cm<sup>2</sup>). Im ganzen wurde gefolgert, daß es damit ohne größeren Aufwand und ohne mehr Geschicklichkeit als bei der üblichen Prüfung möglich ist, mit einer praktisch ausreichenden Zuverlässigkeit die bei Normallagerung der Würfel zu erwartende Betondruckfestigkeit abzuschätzen. Es ist nur nötig, jeweils für die betreffenden Mischungen die Beziehung zwischen Früh- und Normalfestigkeit vorausgehend durch Versuch festzustellen (Eichkurve). Dabei wird bereits darauf hingewiesen, daß dies für jede Mischung nötig sei, weil auch für Zemente gleichen Typs, jedoch aus verschiedenen Werken, nicht unbedingt die gleiche Festigkeitsentwicklung zu erwarten wäre. Ferner wird auch angemerkt, daß mit Rücksicht auf die Arbeitszeit eine Prüfung in einem 24 Stunden-Zyklus unter Umständen zweckmäßiger sein könnte.

Ebenfalls mit dem Ziel, Betonwürfel nach einer Wärmebehandlung frühzeitig zu prüfen und hiernach die 28 Tage-Druckfestigkeit vorauszusagen, wurden auch in Neuseeland mit einer etwa

den englischen Untersuchungen entsprechenden 7 Stunden-Behandlung Versuche angestellt [7]. Dabei wurde gefolgert (Verwendung des gleichen Zements und Wärmeschrankes in 3 Laboratorien), daß die 28 Tage-Druckfestigkeit mit einer Genauigkeit von etwa  $\pm 5\%$  vorausgesagt werden kann.

Früheren Untersuchungen über den Einfluß einer Wärmebehandlung auf die Festigkeit von Beton aus verschiedenen Zementen [8] kann man entnehmen, daß das Verhältnis von 1 Tage-Festigkeit nach Wärmebehandlung zu 28 Tage-Festigkeit bei Normallagerung bei verschiedenen Zementen, jedoch auch bei verschiedener Betonzusammensetzung, unterschiedlich sein kann (vgl. hier Abschnitt 8.3 und Tafel 8).

Insgesamt lassen die zuvor referierten Untersuchungen erwarten, daß durch eine kurzfristige Festigkeitsprüfung nur dann hinreichend zuverlässig auf die Betongüte geschlossen werden kann, wenn sich der Zement und möglicherweise auch die Betonzusammensetzung nur innerhalb bestimmter Grenzen verändern.

### 3. Aufgabe der Untersuchungen

Die in Abschnitt 4. umrissenen Untersuchungen sollen ebenfalls ein Beitrag zu der Frage sein, inwieweit ein Rückschluß von einer durch Wärmebehandlung erreichten Frühfestigkeit auf die bei der Güteprüfung nachzuweisende 28 Tage-Druckfestigkeit des Betons möglich ist. Bei diesen Untersuchungen wurde zunächst davon ausgegangen, daß eine solche Beurteilung auf Mischungen eines Bauvorhabens mit *gleichem* Zement und nicht zu stark schwankender Betonzusammensetzung zu beschränken ist. Stellt man also bei der nach DIN 1045 geforderten, vorausgehenden Eignungsprüfung für die vorgesehene Betonmischung gleichzeitig die zugehörige, nach einer Wärmebehandlung gewonnene Frühfestigkeit fest, so kann bei der laufenden Überwachung durch Bestimmung der Frühfestigkeit spätestens nach 1 Tag auf die zu erwartende 28 Tage-Druckfestigkeit einzelner Mischungen geschlossen werden.

Mit den in Abschnitt 4. kurz behandelten Vorversuchen sollten bisher bekannte Wärme-Schnellprüfverfahren zunächst überprüft und dann nötigenfalls versuchstechnisch so abgeändert werden, daß sie in einem Baustellenlabor einfach und zuverlässig und zugleich mit möglichst wenig zusätzlichen Geräten durchgeführt werden können.

Mit den Hauptuntersuchungen war in erster Linie zu klären, ob mit den ausgewählten Verfahren der Prüfvorgang so beherrscht werden kann, daß bei wiederholten Prüfungen der *gleichen* Mischung nur geringe Streuungen gegenüber dem anfänglich für diese Mischung festgelegten Verhältniswert aus Frühfestigkeit und 28 Tage-Festigkeit zu erwarten sind, so daß mit ihm eigentliche Änderungen der Güte der Mischung zuverlässig erfaßt werden können. Es sollte auch durch Benutzung verschiedener Betonmischungen geklärt werden, ob der bei der Eignungsprüfung für die vorgesehene Mischung ermittelte (festgelegte) Verhältniswert zwischen Früh- und 28 Tage-Festigkeit (Normalfestigkeit) sich nicht allein schon durch die vorkommenden Schwankungen der Mischungszusammensetzung, die gerade in ihrem Einfluß auf die Normalfestigkeit aufgezeigt werden sollen, ändert.

## 4. Vorversuche und Versuchsplan

### 4.1 Vorversuche

Durch zahlreiche Vorversuche, bei denen die Frühfestigkeit zum Teil bereits nach 7 h bestimmt und bei denen auch verschiedene Prüfverfahren gewählt wurden, sind schließlich die in den Abschnitten 6. und 7. beschriebenen Prüfverfahren ausgewählt worden. Als Wärmebehandlung zur Erlangung der Frühfestigkeit wurde Kochen in einem Wasserbad oder Lagern in einem Wärmeschrank vorgesehen. Würfel mit 10 cm Kantenlänge erschienen hierfür zweckmäßiger als die üblichen 20 cm-Würfel. Mit 10 cm-Würfeln kann einerseits noch Beton mit 30 mm Größtkorn geprüft werden, andererseits können sie noch in einem Kessel oder elektrischen Wärmeschrank untergebracht werden. Kleinere Würfel mit nur 10 cm Kantenlänge sind auch angezeigt, um keine zu großen oder zu lange anhaltenden Unterschiede der Temperatur zwischen Kern und Randzone des Betons zu erhalten.

Die Vorversuche mit Kochbehandlung an Betonen mit 7 verschiedenen Zementen und jeweils 350 kg Zement je m<sup>3</sup> Beton ergaben, daß bereits durch 5stündiges Kochen und bei einer Prüfung nach 8 h brauchbare Frühfestigkeiten erhalten wurden. Das bei einzelnen Würfeln und Zementen beobachtete Auftreiben und Auflockern einer 0,5 bis 1 cm dicken Schicht an der oberen Fläche konnten durch Auflegen von 3 cm dicken Stahlplatten vermieden werden. Die Verhältniszahlen zwischen Frühfestigkeit der 10 cm-Würfel und der Normaldruckfestigkeit nach 28 Tagen (20 cm-Würfel) lagen, abhängig vom Zement, zwischen 0,31 und 0,58 und unterschieden sich somit bis nahezu 100 %.

Die Hauptuntersuchungen wurden jedoch auf eine Prüfung der Frühfestigkeit nach 24 h abgestimmt, weil noch zu klären ist, ob durch eine Prüfung unmittelbar nach der Wärmebehandlung — sei es im warmen Zustand der Würfel oder nach kurzem Abkühlen — nicht beherrschbare Temperaturunterschiede und damit Spannungen im Würfel entstehen, die zur Streuung der Prüfwerte beitragen. Die 24 Stunden-Prüfung läßt sich zudem auf der Baustelle u. U. auch einfacher in den Arbeitsablauf eines Baustellenlaboratoriums einschalten, da die Würfel dann immer während der Arbeitszeit und gegebenenfalls auch in einer entfernt liegenden Prüfstelle abgedrückt werden können.

### 4.2 Versuchsplan

Für die Hauptuntersuchungen wurden zwei Zemente, ein Portlandzement R und ein Hochofenzement Q, als Vertreter der Zemente der Güteklasse Z 275 benutzt. Durch Zementgehalte zwischen rd. 250 kg/m<sup>3</sup> und 360 kg/m<sup>3</sup>, Wasserzementwerte von 0,45, 0,58 sowie 0,70 und 3 Konsistenzgrade (steif, weich, flüssig) wurde ein möglichst weiter Bereich der üblichen Zusammensetzung des Konstruktionsbetons erfaßt. Für alle Mischungen war das gleiche Zuschlaggemisch 0/30 mm aus Rheinkies sand vorgesehen.

Zur Beurteilung der Versuchsstreuungen wurde ein Teil der Mischungen an jeweils verschiedenen Tagen 4- oder sogar 6mal geprüft.

Eine Übersicht über die Zusammensetzung der einbezogenen Mischungen und die Anzahl der Prüfungen gibt Tafel 1.

Tafel 1 Kennzeichnung der Mischungen und Anzahl der Wiederholprüfungen

| 1                | 2                                 | 3                     | 4          |
|------------------|-----------------------------------|-----------------------|------------|
| Mischungen *)    | Zementgehalt<br>kg/m <sup>3</sup> | Wasser-<br>zementwert | Konsistenz |
| R 1 (6); Q 1 (6) | rd. 325                           | 0,45                  | steif      |
| R 2 (4); Q 2 (1) |                                   | 0,58                  | weich      |
| R 3 (4); Q 3 (1) |                                   | 0,70                  | flüssig    |
| R 4 (6); Q 4 (6) | rd. 250                           | 0,58                  | steif      |
| R 5 (4); Q 5 (1) | rd. 310                           |                       | weich      |
| R 6 (4); Q 6 (1) | rd. 360                           |                       | flüssig    |

\*) Die Ziffern in den Klammern geben an, wie oft eine Mischung hergestellt und geprüft wurde

Die Mischungen (Spalte 1) aus Portlandzement sind mit R 1 bis R 6, die aus Hochofenzement mit Q 1 bis Q 6 bezeichnet.

Die Druckfestigkeit im Alter von 24 h nach verschiedenartiger Wärmebehandlung wurde an Würfeln mit 10 cm Kantenlänge und die Druckfestigkeit im Alter von 28 Tagen nach Normallagerung (DIN 1048) an 20 cm-Würfeln geprüft. Die 10 cm-Würfel erhärteten bei 100 °C (in kochendem Wasser; Kochbehandlung K) oder in Luft von 80 °C in einem Wärmeschrank (Warmluftbehandlung W).

Tafel 2 Zusammensetzung der Zemente

| Bestandteile<br>Gew.-%         | Portlandzement R |                   | Hochofenzement Q |                   |
|--------------------------------|------------------|-------------------|------------------|-------------------|
|                                |                  | ohne<br>Glühverl. |                  | ohne<br>Glühverl. |
| Unlösliches                    | 0,72             | 0,74              | 0,20             | 0,20              |
| SiO <sub>2</sub>               | 21,93            | 22,48             | 28,40            | 28,68             |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 4,48             | 4,59              | 11,35            | 11,46             |
| TiO <sub>2</sub>               |                  |                   |                  |                   |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  |                  |                   |                  |                   |
| FeO                            |                  |                   | 0,88             | 0,89              |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 1,54             | 1,58              |                  |                   |
| MnO                            |                  |                   | 1,21             | 1,23              |
| Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0,04             | 0,04              |                  |                   |
| CaO                            | 65,76            | 67,42             | 47,74            | 48,20             |
| MgO                            | 0,69             | 0,71              | 4,38             | 4,42              |
| SO <sub>3</sub>                | 1,75             | (1,79)            | 2,95             | (2,98)            |
| S                              |                  |                   | 0,96             | (0,97)            |
| K <sub>2</sub> O               | 0,35             | 0,36              | 0,85             | 0,85              |
| Na <sub>2</sub> O              | 0,19             | 0,20              | 0,53             | 0,54              |
| Glühverlust                    | 2,47             |                   | 0,97             |                   |
| nicht best. Rest               | 0,08             | 0,09              | 0,06             | 0,06              |
| Summe                          | 100,00           | 100,00            | 100,48           | 100,48            |

(Über das Ziel der Untersuchungen hinaus wurden an normalgelagerten Würfeln mit 10 cm Kantenlänge nebenbei Angaben über das Verhältnis der Druckfestigkeit von 10- und 20 cm-Würfeln erhalten.)

## 5. Zemente, Betone und Herstellen der Würfel

### 5.1 Zemente

Die Zusammensetzung der beiden Zemente R und Q findet sich in Tafel 2. Die Anteile der nach Bogue errechneten Klinkerphasen\*) des Portlandzements R betragen: 9 %  $C_3A$ , 64 %  $C_3S$ , 15 %  $C_2S$  und 5 %  $C_4AF$ ; sie entsprechen denen eines deutschen Portlandzements mit guten hydraulischen Eigenschaften. Der klinkerarme Hochofenzement Q enthielt den besonders hohen Anteil von 80 % Hüttensand.

Tafel 3 enthält die Zementeigenschaften bei Prüfung nach DIN 1164. Hiernach erstarrte der Hochofenzement verhältnismäßig spät (Erstarrungsbeginn 7 h 10 m) und wesentlich später als der Portlandzement (3 h 45 m). Der Portlandzement (PZ) war mit 11,4 % R 0,09 mm sehr grob und der Hochofenzement (HOZ) mit 0,6 % sehr fein gemahlen. Während sich die Festigkeiten nach 28 Tagen, wie vorgesehen, nur wenig unterschieden, blieben die 1 und 3 Tage-Normenfestigkeiten des HOZ naturgemäß noch stark zurück.

### 5.2 Zuschlag

Das Zuschlaggemisch wurde aus den Korngruppen 1...2 mm, 0...3 mm, 3...7 mm, 7...15 mm, 15...30 mm (Rheinkiessand) sowie Quarzmehl bis 0,2 mm (Normensand I; d. i. gemahlener Quarzsand) zusammengesetzt. Die Sieblinie verlief im oberen Teil des „besonders guten Bereichs“ der Regelsieblinien nach DIN 1045. Das Gemisch enthielt folgende Anteile:

|         |    |    |    |    |     |    |
|---------|----|----|----|----|-----|----|
| bis 0,2 | 1  | 3  | 7  | 15 | 30  | mm |
| 6,5     | 16 | 35 | 54 | 81 | 100 | %  |

Der Rheinkiessand bestand überwiegend aus quarzhaltigem Gestein.

### 5.3 Eigenschaften des Frischbetons, Herstellen und Lagern der Würfel

Die Mischungen, je für 40 I Festbeton ausreichend, wurden 2 min lang in einem 50 l-Zwangsmischer gemischt. Die am Frischbeton festgestellten Zementgehalte sind in Tafel 4, Spalte 3, aufgeführt, ebenso die Frischbetonrohgewichte und die Konsistenzmaße. Demnach entsprachen die verschiedenen Mischungen der im Versuchsplan vorgesehenen Zusammensetzung.

Für jede der Prüfungen (nach Kochbehandlung, Warmluftbehandlung und Normallagerung) wurden aus einer Mischung

\*) ASTM (C 150—60)

Tafel 3 Prüfung der Zemente nach DIN 1164

| 1      | 2   | 3         | 4        | 5                          | 6  | 7  | 8  | 9  | 10  | 11  | 12  | 13  |
|--------|-----|-----------|----------|----------------------------|--|----|----|----|---|-----|-----|-----|
| Zement |     | Erstarren |          | Rückst.<br>Sieb<br>0,09 mm | Biegezugfestigkeit in $\text{kp/cm}^2$<br>nach Tagen |    |    |    | Druckfestigkeit in $\text{kp/cm}^2$<br>nach Tagen |     |     |     |
| Bez.   | Art | Beginn    | Ende     |                            | 1  | 3  | 7  | 28 | 1   | 3   | 7   | 28  |
| R      | PZ  | 3 h 45 m  | 4 h 55 m | 11,4 %                     | 15   | 38 | 50 | 68 | 50  | 175 | 263 | 375 |
| Q      | HOZ | 7 h 10 m  | 8 h 30 m | 0,6 %                      | 5  | 23 | 39 | 76 | 14  | 80  | 174 | 350 |

Tafel 4 Eigenschaften des Frischbetons

| 1     | 2       | 3                               | 4                | 5   | 6          | 7                                    | 8                               |
|-------|---------|---------------------------------|------------------|---|------------|--------------------------------------|---------------------------------|
| Reihe | Zement  | Zementgehalt<br>$\text{kg/m}^3$ | Wassorzementwert | Frischbeton-<br>rohichte<br>$\text{kp/m}^3$ | Konsistenz | Zahl der<br>Aufschläge <sup>1)</sup> | Ausbreitmaß <sup>2)</sup><br>cm |
| R 1   | PZ 275  | 323                             | 0,45             | 2430  | steif      | 16                                   | —                               |
| R 2   |         | 325                             | 0,58             | 2410  | weich      | 6                                    | 50                              |
| R 3   |         | 330                             | 0,70             | 2350  | flüssig    | —                                    | > 70                            |
| R 4   |         | 252                             | 0,58             | 2410  | steif      | 14                                   | —                               |
| R 5   |         | 307                             |                  | 2410  | weich      | 7                                    | 42                              |
| R 6   |         | 361                             |                  | 2390  | flüssig    | 3                                    | 61                              |
| Q 1   | HOZ 275 | 322                             | 0,45             | 2420  | steif      | 15                                   | —                               |
| Q 2   |         | 327                             | 0,58             | 2390  | weich      | 6                                    | 50                              |
| Q 3   |         | 327                             | 0,70             | 2320  | flüssig    | —                                    | > 70                            |
| Q 4   |         | 252                             | 0,58             | 2410  | steif      | 13                                   | —                               |
| Q 5   |         | 307                             |                  | 2410  | weich      | 10                                   | 44                              |
| Q 6   |         | 361                             |                  | 2390  | flüssig    | —                                    | > 70                            |

<sup>1)</sup> Verformungsgerät nach Powers <sup>2)</sup> Ausbreitmaß nach DIN 1048

gleichzeitig je 3 Würfel hergestellt (9 Stück 10 cm-Würfel und 3 Stück 20 cm-Würfel). Wiederholungen der Prüfung von gleichen Mischungen folgten im Abstand von 1 bis 4 Tagen über rd. 14 Tage hinweg.

Der steife Beton wurde in den Stahlformen durch Rütteln auf einem Rütteltisch, der weiche Beton durch Stochern und sehr kurzes Rütteln und der flüssige Beton durch Stochern je immer in gleicher Weise verdichtet. (Die Rüttelwirkung der von Hand auf den Rütteltisch aufgedrückten Formen dauerte 10 bzw. 40 sec; Schwingungszahl 2800/min, Schwingungsbreite rd. 1 mm.) Die Temperatur des Frischbetons der 44 Mischungen lag zwischen +15 und +20 °C. Der überstehende Beton wurde bei allen Würfeln unmittelbar nach dem Verdichten abgestrichen.

Die für die Prüfung im Alter von 28 Tagen vorgesehenen 20 cm-Würfel lagerten wie bei der Eignungs- und Güteprüfung nach DIN 1048 (Raumtemperatur 20 °C; 7 Tage unter nassen Tüchern, dann 21 Tage an der Luft mit 65% relativer Feuchtigkeit). Die 10 cm-Würfel erhärteten, wie in den folgenden Abschnitten 6. und 7. im einzelnen aufgeführt ist, in kochendem Wasser oder in Warmluft.

## 6. Kochbehandlung

Bei diesem Verfahren wurden die in Bild 1 wiedergegebenen Geräte benutzt:

- Emailliekessel (d = 48 cm, h = 43 cm) mit Deckel;
- 5 cm hoher Holzrost in den Topf passend;
- elektrische Heizplatte (d = 40 cm) mit einer Leistung von 5 kW und 3 Stufen-Schaltung.

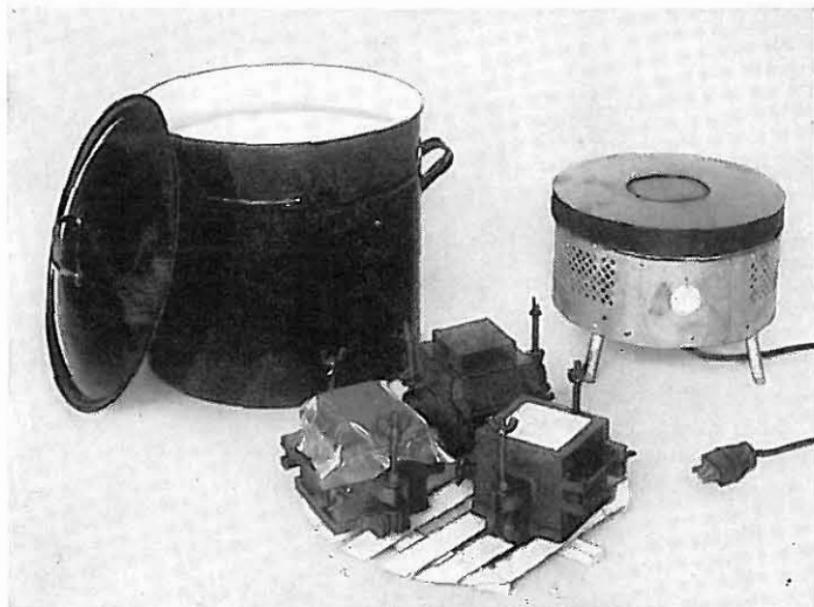


Bild 1 Geräte für die Kochbehandlung (K) (vorne links fertige, abgedeckte Würfel, in der Mitte gefüllter Würfel mit Abdeckplatte, vorne rechts ohne Abdeckplatte)

Der Versuch lief nach dem Füllen der Formen wie folgt ab:

Aufsetzen der Stahlplatten (3 cm dick; 9,6 cm x 9,6 cm breit); Abschließen des oberen Teils der Formen mit Plastikfolie und Gummiband (um zu verhindern, daß Kondenswasser oder übersprudelndes Wasser auf die obere Betonfläche gelangt);

Einsetzen der Formen auf den Holzrost im Kessel und Füllen des Kessels mit Wasser von 20 °C bis 1 cm unter die obere Formkante; Auflegen des Deckels;

2 h: Vorlagerung bei rd. 16 bis 20 °C;

1 h: gleichmäßiges Erhitzen des Wassers bis zum Kochen durch entsprechende Regelung der Heizleistung;

5 h: dauerndes Kochen (Ergänzung verdampften Wassers durch Nachfüllen heißen Wassers; 1 l nach je etwa 20 bis 30 min); anschließend Abschalten der Heizplatte;

16 h: langsames Abkühlen von Wasser und Formen im geschlossenen Kessel. (Falls das Gerät früher benötigt wird, können die Formen in ein anderes, geschlossenes Gefäß mit heißem Wasser eingesetzt werden und dort langsam abkühlen.) Entformen der Würfel und Prüfung im Alter von 24 h.

Bei sechs verschiedenen Mischungen und insgesamt acht Versuchen war jeweils in einem der Würfel in der Mitte ein Thermoelement einbetoniert; ebenso war auch ein Thermoelement in das Wasserbad eingetaucht. Die Temperaturen wurden laufend von einem Diagramm-Schreiber aufgenommen. Der mittlere Temperaturverlauf ist in Bild 2 wiedergegeben. Der Streubereich war sehr klein (Beton  $\pm 3^\circ\text{C}$ , Wasser  $\pm 2^\circ\text{C}$ ).

Aus Bild 2 ist zu ersehen, daß beim Erhitzen die Betontemperatur der Wassertemperatur nur wenig nachhilt. (Die Temperatur von 100 °C wurde im Beton etwa  $\frac{1}{4}$  h später erreicht.) Beim Ab-

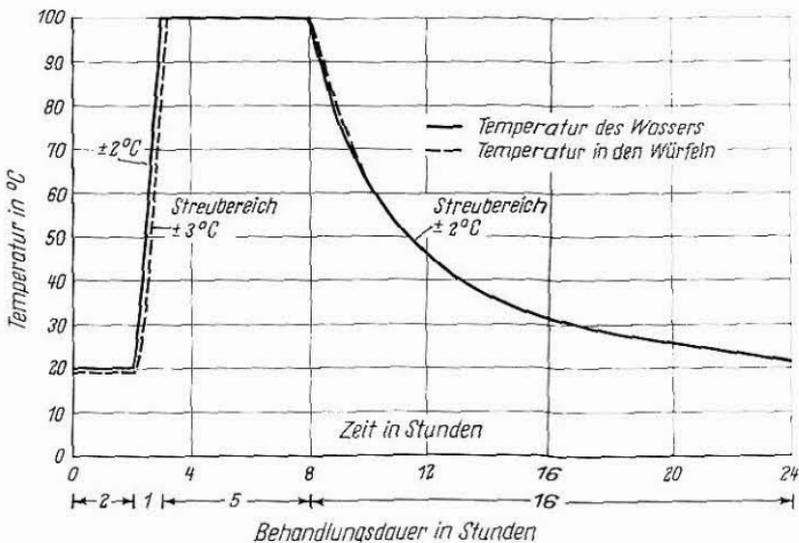


Bild 2 Kochbehandlung. Verlauf der Temperatur im Wasserbad und im Kern der Würfel



Bild 3 Würfelformen mit Abdeckplatte zur Warmluftbehandlung (W) im Wärmeschrank (handelsüblicher Trockenschrank, größte Heizleistung 6 kW; innere Abmessungen 60 cm × 50 cm × 60 cm)

kühlen blieb nur während der ersten 2 h die Kerntemperatur des Betons unbedeutend über der des Wassers.

Während des Kochens und des anschließenden Abkühlens stimmen also die Wassertemperatur und die Betontemperatur weitgehend überein.

## 7. Warmluftbehandlung

Hierbei wurde wie folgt vorgegangen:

Aufsetzen der Stahlplatten auf die Würfelformen (ohne Einhüllen in Plastikfolien);

2 h: Vorlagerung bei 16 bis 20 °C;

Einsetzen in den unbeheizten Wärmeschrank (Bild 3) und Schließen der Tür sowie des Frischluftschiebers;

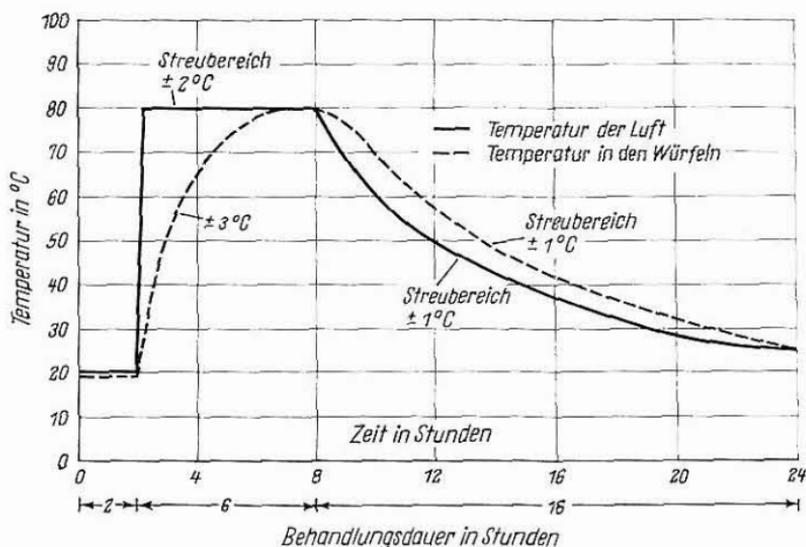


Bild 4 Warmluftbehandlung. Verlauf der Temperatur der Luft im Wärmeschrank und im Kern der Würfel

Einschalten des Ventilators sowie der Temperaturregelung auf die 80 °C-Stufe;

6 h: Erwärmen bei 80 °C, anschließend Abschalten der Heizung und des Ventilators sowie Öffnen des Frischluftschiebers;

16 h: langsames Abkühlen im geschlossenen Schrank. (Falls der Wärmeschrank schon früher benötigt wird, können die Formen während dieser Zeit in einem kleinen, mit trockenen Tüchern, Dämmplatten oder ähnlichem isoliertem Behälter langsam abkühlen.) Entformen der Würfel und Prüfen im Alter von 24 h.

Wie bei der Kochbehandlung wurden wieder die Luft- und Betontemperaturen gemessen. Der mittlere Temperaturverlauf ist in Bild 4 dargestellt. Die Luft im Schrank erreichte bereits nach rd.  $\frac{1}{4}$  h die Temperatur von 80 °C. Im Gegensatz zur Kochbehandlung, bei der die Kerntemperatur sich sehr rasch der Wassertemperatur annähert, eilte die Kerntemperatur des Betons der Lufttemperatur sehr stark nach und erreichte erst nach etwa 5 h, also gegen Ende der Beheizung, die von Anfang an eingestellte Lufttemperatur von 80 °C. Andererseits kühlte der Beton hier langsamer ab als beim Kochversuch. Dadurch wurde der Grad  $\times$  Stunden-Wert, also die bestimmende Größe für die Reifefunktion [9] bzw. die Abhängigkeit des Erhärtungsstandes von der Summe der Produkte aus Zeit und Temperatur der Lagerung, für den Beton ebenfalls etwa so groß erhalten wie der Grad  $\times$  Stunden-Wert für die Luft im Schrank.

## 8. Versuchsergebnisse

### 8.1 Streuung bei wiederholter Prüfung der gleichen Mischung

In Tafel 5 sind die Prüfergebnisse für die 6 Mischungen R1 bis R6 aus Portlandzement R aufgeführt (Druckfestigkeit der nach

Kochbehandlung K oder Warmluftbehandlung W im Alter von 24 h geprüften 10 cm-Würfel und Druckfestigkeit B der im Alter von 28 Tagen nach Normallagerung geprüften 20 cm-Würfel). Die Mischungen R 1 und R 4 wurden je 6mal, die Mischungen R 2, R 3, R 5 und R 6 je 4mal hergestellt und geprüft.

Bei den Rohwichten (Spalten 2, 3 und 4) fällt auf, daß der wassergelagerte Beton der Würfel nach Kochbehandlung (K) immer schwerer erhalten wurde als der Beton der Würfel nach Warmluftbehandlung und Normallagerung. (Wahrscheinlich wurde bei der Warmluftbehandlung dem Beton Wasser entzogen, während er bei der Kochbehandlung infolge Entlüftung und Wassernachsaugen schwerer wurde.)

Besonders bemerkenswert ist, daß die Druckfestigkeiten K und W (Spalten 5 und 6) der jeweils zusammengehörenden 3 Würfel eines Satzes sich mit einigen Ausnahmen nur sehr gering unterschieden und die in DIN 1048, § 8, Ziffer 6, höchst zulässige Abweichung von 15 % vom Mittelwert nach unten bei den 56 Würfelsätzen nur in einem Falle erreichten.

Weiter sei hervorgehoben, daß der Variationskoeffizient der Druckfestigkeiten K und W bei der zu verschiedener Zeit durchgeführten 6- oder 4maligen Prüfung der gleichen Mischung verhältnismäßig klein ausfiel und zwischen 2,3 % und 8,2 % lag. Der entsprechende Variationskoeffizient der Druckfestigkeit B der 20 cm-Würfel (Spalte 7) fand sich zwischen 1,7 % und 11,4 %.\*)

Auffallend ist auch, daß sich die Druckfestigkeit des Betons mit PZ nach Koch- oder Warmluftbehandlung nur sehr wenig unterschied.

In den Spalten 8 und 9 der Tafel 5 finden sich die Verhältnismerte  $K : B$  und  $W : B$  für den Beton aus Portlandzement. Sie lassen erkennen, welche anteilige Druckfestigkeit bei den 10 cm-Würfeln im Alter von 24 h nach Kochbehandlung (K) und Warmluftbehandlung (W) im Vergleich zur Normal-Druckfestigkeit B der 20 cm-Würfel (DIN 1048) entstand. Die Verhältnismerte  $K : B$  und  $W : B$  liegen für die verschiedenen Betone aus Portlandzement als Mittel aus den zusammengehörenden Mischungen (ohne Reihe R 3) zwischen 0,56 und 0,44. Der Variationskoeffizient findet sich für den Verhältnismerte, wenn wieder die Reihe R 3 ausgenommen wird, zwischen 3,7 % und 9,3 %.

Bei der statistischen Auswertung von Betonprüfungen (Festigkeit einzelner Würfel) gilt im allgemeinen für eine Baustellenüberwachung ein Variationskoeffizient von 10 % noch als Maß für wenig streuende Festigkeiten gleicher Mischungen [10].

Der größere Variationskoeffizient der Reihe R 3 (13,1 % und 15,8 %) ist auch durch die größeren Streuungen der Druckfestig-

\*) Der Variationskoeffizient wurde mit den Satzmittelwerten (Mittel aus 3 zusammengehörenden Würfeln) errechnet. Dadurch wurde ein Teil der Prüfstreuung eliminiert, was jedoch im Hinblick auf die derzeitige Betonprüfung (stets Mittel aus drei Einzelprüfungen) gerechtfertigt ist. Der Variationskoeffizient wurde hier aus nur 4 bis 6 Werten errechnet und kann daher nur als Anhalt dienen.

Tafel 5 Wiederholte Prüfung von Beton gleicher Zusammensetzung aus Portlandzement R

Druckfestigkeit von 28 Tage alten 20 cm-Würfeln (B) nach DIN 1048 und von 1 Tag alten 10 cm-Würfeln. Erhärtung der 10 cm-Würfel entweder in kochendem Wasser (Kochbehandlung K) oder im Wärmeschrank bei 80 °C (Warmluftbehandlung W).

| 1                     | 2                                   | 3                       | 4                       | 5                          | 6                       | 7                       | 8               | 9             |
|-----------------------|-------------------------------------|-------------------------|-------------------------|----------------------------|-------------------------|-------------------------|-----------------|---------------|
| Reihe                 | Rohwichte der Würfel<br>Mittelwerte |                         |                         | Druckfestigkeit der Würfel |                         |                         | Verhältniswerte |               |
|                       | K<br>kp/dm <sup>3</sup>             | W<br>kp/dm <sup>3</sup> | B<br>kp/dm <sup>3</sup> | K<br>kp/cm <sup>2</sup>    | W<br>kp/cm <sup>2</sup> | B<br>kp/cm <sup>2</sup> | $\frac{K}{B}$   | $\frac{W}{B}$ |
| R 1                   | 2,43                                | 2,40                    | 2,41                    | (249+242+249) : 3 = 247    | (246+218+238) : 3 = 234 | (463+466+448) : 3 = 459 | 0,54            | 0,51          |
|                       | 2,42                                | 2,40                    | 2,40                    | (268+290+255) : 3 = 271    | (235+244+256) : 3 = 245 | (460+466+470) : 3 = 465 | 0,58            | 0,53          |
|                       | 2,44                                | 2,40                    | 2,40                    | (264+253+264) : 3 = 260    | (289+265+278) : 3 = 277 | (458+461+489) : 3 = 478 | 0,54            | 0,58          |
|                       | 2,42                                | 2,42                    | 2,40                    | (273+262+264) : 3 = 266    | (263+242+256) : 3 = 254 | (456+463+449) : 3 = 456 | 0,58            | 0,56          |
|                       | 2,43                                | 2,40                    | 2,40                    | (279+277+266) : 3 = 274    | (270+250+249) : 3 = 256 | (483+468+459) : 3 = 470 | 0,58            | 0,54          |
|                       | 2,43                                | 2,39                    | 2,40                    | (263+254+258) : 3 = 258    | (269+258+251) : 3 = 259 | (466+474+460) : 3 = 467 | 0,55            | 0,55          |
| Mittel                | 2,43                                | 2,40                    | 2,40                    | 263                        | 254                     | 466                     | 0,56            | 0,54          |
| Variationskoeffizient |                                     |                         |                         | 3,7 %                      | 5,7 %                   | 1,7 %                   | 3,7 %           | 4,5 %         |
| R 2                   | 2,40                                | 2,36                    | 2,36                    | (153+154+144) : 3 = 150    | (165+158+149) : 3 = 157 | (326+314+317) : 3 = 319 | 0,47            | 0,49          |
|                       | 2,42                                | 2,38                    | 2,37                    | (160+182+157) : 3 = 166    | (159+171+160) : 3 = 163 | (352+346+364) : 3 = 354 | 0,47            | 0,46          |
|                       | 2,40                                | 2,38                    | 2,37                    | (179+158+171) : 3 = 169    | (159+173+173) : 3 = 168 | (342+324+331) : 3 = 332 | 0,51            | 0,51          |
|                       | 2,39                                | 2,36                    | 2,35                    | (140+144+143) : 3 = 142    | (151+140+147) : 3 = 146 | (308+312+311) : 3 = 310 | 0,46            | 0,47          |
|                       | 2,40                                | 2,37                    | 2,36                    | 157                        | 158                     | 329                     | 0,48            | 0,48          |
| Variationskoeffizient |                                     |                         |                         | 8,2 %                      | 6,0 %                   | 5,8 %                   | 4,7 %           | 4,7 %         |
| R 3                   | 2,38                                | 2,32                    | 2,32                    | ( 80+ 82+ 71) : 3 = 78     | ( 70+ 69+ 70) : 3 = 70  | (208+243+230) : 3 = 227 | 0,34            | 0,31          |
|                       | 2,38                                | 2,31                    | 2,30                    | ( 84+ 76+ 78) : 3 = 79     | ( 68+ 68+ 71) : 3 = 69  | (181+187+234) : 3 = 201 | 0,39            | 0,34          |
|                       | 2,38                                | 2,31                    | 2,31                    | ( 83+ 80+ 83) : 3 = 82     | ( 82+ 76+ 77) : 3 = 78  | (173+173+187) : 3 = 178 | 0,46            | 0,44          |
|                       | 2,36                                | 2,30                    | 2,29                    | ( 82+ 72+ 83) : 3 = 79     | ( 67+ 82+ 69) : 3 = 73  | (186+168+192) : 3 = 182 | 0,43            | 0,40          |
| Mittel                | 2,38                                | 2,31                    | 2,30                    | 80                         | 72                      | 197                     | 0,40            | 0,37          |
| Variationskoeffizient |                                     |                         |                         | 2,3 %                      | 5,7 %                   | 11,4 %                  | 13,1 %          | 15,8 %        |

Fortsetzung von Tafel 5 Wiederholte Prüfung von Beton gleicher Zusammensetzung aus Portlandzement R

Druckfestigkeit von 28 Tage alten 20 cm-Würfeln (B) nach DIN 1048 und von 1 Tag alten 10 cm-Würfeln. Erhärtung der 10 cm-Würfel entweder in kochendem Wasser (Kochbehandlung K) oder im Wärmeschrank bei 80 °C (Wamluftbehandlung W).

| 1                     | 2                                   | 3                       | 4                       | 5                          | 6                       | 7                       | 8               | 9             |
|-----------------------|-------------------------------------|-------------------------|-------------------------|----------------------------|-------------------------|-------------------------|-----------------|---------------|
| Reihe                 | Rohwichte der Würfel<br>Mittelwerte |                         |                         | Druckfestigkeit der Würfel |                         |                         | Verhältniswerte |               |
|                       | K<br>kp/dm <sup>3</sup>             | W<br>kp/dm <sup>3</sup> | B<br>kp/dm <sup>3</sup> | K<br>kp/cm <sup>2</sup>    | W<br>kp/cm <sup>2</sup> | B<br>kp/cm <sup>2</sup> | $\frac{K}{B}$   | $\frac{W}{B}$ |
| R 4                   | 2,43                                | 2,39                    | 2,39                    | (157+164+159) : 3 = 160    | (179+175+171) : 3 = 175 | (358+359+350) : 3 = 356 | 0,45            | 0,49          |
|                       | 2,44                                | 2,39                    | 2,39                    | (157+177+159) : 3 = 164    | (159+174+176) : 3 = 170 | (337+342+328) : 3 = 336 | 0,49            | 0,51          |
|                       | 2,43                                | 2,39                    | 2,38                    | (167+170+169) : 3 = 169    | (165+174+174) : 3 = 171 | (348+342+330) : 3 = 340 | 0,50            | 0,50          |
|                       | 2,43                                | 2,39                    | 2,38                    | (155+154+164) : 3 = 158    | (178+177+166) : 3 = 174 | (337+338+332) : 3 = 336 | 0,47            | 0,52          |
|                       | 2,42                                | 2,39                    | 2,38                    | (120+145+161) : 3 = 142    | (152+157+151) : 3 = 153 | (350+338+325) : 3 = 338 | 0,42            | 0,45          |
|                       | 2,45                                | 2,38                    | 2,38                    | (166+155+164) : 3 = 162    | (156+160+162) : 3 = 159 | (338+346+325) : 3 = 336 | 0,48            | 0,47          |
| Mittel                | 2,43                                | 2,39                    | 2,38                    | 159                        | 167                     | 340                     | 0,47            | 0,49          |
| Variationskoeffizient |                                     |                         |                         | 5,8 %                      | 5,3 %                   | 2,3 %                   | 6,2 %           | 5,1 %         |
| R 5                   | 2,42                                | 2,37                    | 2,37                    | (165+159+162) : 3 = 162    | (157+153+152) : 3 = 154 | (329+327+320) : 3 = 325 | 0,50            | 0,47          |
|                       | 2,42                                | 2,36                    | 2,37                    | (149+143+141) : 3 = 144    | (150+128+127) : 3 = 135 | (308+323+311) : 3 = 314 | 0,46            | 0,43          |
|                       | 2,42                                | 2,37                    | 2,37                    | (144+154+141) : 3 = 146    | (141+131+134) : 3 = 135 | (330+311+348) : 3 = 330 | 0,44            | 0,41          |
|                       | 2,41                                | 2,39                    | 2,37                    | (134+137+134) : 3 = 135    | (152+146+145) : 3 = 148 | (311+285+306) : 3 = 301 | 0,45            | 0,49          |
| Mittel                | 2,42                                | 2,37                    | 2,37                    | 147                        | 143                     | 318                     | 0,46            | 0,45          |
| Variationskoeffizient |                                     |                         |                         | 7,6 %                      | 6,7 %                   | 4,1 %                   | 5,8 %           | 8,1 %         |
| R 6                   | 2,41                                | 2,35                    | 2,35                    | (152+151+141) : 3 = 148    | (127+145+134) : 3 = 135 | (334+343+354) : 3 = 344 | 0,43            | 0,39          |
|                       | 2,38                                | 2,35                    | 2,34                    | (151+150+157) : 3 = 153    | (140+139+155) : 3 = 146 | (308+287+297) : 3 = 297 | 0,52            | 0,49          |
|                       | 2,37                                | 2,35                    | 2,33                    | (137+134+129) : 3 = 133    | (127+130+125) : 3 = 127 | (289+293+288) : 3 = 290 | 0,46            | 0,44          |
|                       | 2,40                                | 2,33                    | 2,33                    | (137+127+128) : 3 = 131    | (120+121+131) : 3 = 124 | (282+283+276) : 3 = 280 | 0,47            | 0,44          |
| Mittel                | 2,39                                | 2,34                    | 2,34                    | 141                        | 133                     | 303                     | 0,47            | 0,44          |
| Variationskoeffizient |                                     |                         |                         | 7,7 %                      | 7,4 %                   | 9,4 %                   | 8,0 %           | 9,3 %         |

Tafel 6 Wiederholte Prüfung von Beton gleicher Zusammensetzung aus Hochofenzement Q

Druckfestigkeit von 28 Tage alten 20 cm-Würfeln (B) nach DIN 1048 und von 1 Tag alten 10 cm-Würfeln, Erhärtung der 10 cm-Würfel entweder in kochendem Wasser (Kochbehandlung K) oder im Wärmeschrank bei 80 °C (Warmluftbehandlung W).

| 1                     | 2                                   | 3                       | 4                       | 5                          | 6                       | 7                       | 8                | 9             |
|-----------------------|-------------------------------------|-------------------------|-------------------------|----------------------------|-------------------------|-------------------------|------------------|---------------|
| Reihe                 | Rohwichte der Würfel<br>Mittelwerte |                         |                         | Druckfestigkeit der Würfel |                         |                         | Verhältnisswerte |               |
|                       | K<br>kp/dm <sup>3</sup>             | W<br>kp/dm <sup>3</sup> | B<br>kp/dm <sup>3</sup> | K<br>kp/cm <sup>2</sup>    | W<br>kp/cm <sup>2</sup> | B<br>kp/cm <sup>2</sup> | $\frac{K}{B}$    | $\frac{W}{B}$ |
| Q 1                   | 2,44                                | 2,41                    | 2,41                    | (412+423+399) : 3 = 411    | (339+332+344) : 3 = 338 | (415+440+431) : 3 = 429 | 0,96             | 0,79          |
|                       | 2,43                                | 2,41                    | 2,40                    | (412+397+394) : 3 = 401    | (319+315+333) : 3 = 322 | (444+448+424) : 3 = 439 | 0,91             | 0,73          |
|                       | 2,43                                | 2,40                    | 2,41                    | (408+407+421) : 3 = 412    | (334+349+376) : 3 = 353 | (439+428+418) : 3 = 428 | 0,96             | 0,82          |
|                       | 2,42                                | 2,40                    | 2,41                    | (408+383+404) : 3 = 398    | (371+335+351) : 3 = 352 | (424+412+419) : 3 = 418 | 0,95             | 0,84          |
|                       | 2,43                                | 2,40                    | 2,40                    | (420+412+425) : 3 = 419    | (367+351+353) : 3 = 357 | (433+414+415) : 3 = 421 | 1,00             | 0,85          |
|                       | 2,42                                | 2,39                    | 2,40                    | (392+427+441) : 3 = 420    | (341+320+340) : 3 = 334 | (415+381+409) : 3 = 402 | 1,04             | 0,83          |
| Mittel                | 2,43                                | 2,40                    | 2,40                    | 410                        | 343                     | 423                     | 0,97             | 0,81          |
| Variationskoeffizient |                                     |                         |                         | 2,2 %                      | 4,0 %                   | 3,0 %                   | 4,6 %            | 5,5 %         |
| Q 4                   | 2,42                                | 2,39                    | 2,39                    | (331+323+330) : 3 = 328    | (268+277+269) : 3 = 271 | (321+298+300) : 3 = 306 | 1,07             | 0,89          |
|                       | 2,42                                | 2,39                    | 2,39                    | (310+300+304) : 3 = 305    | (260+278+263) : 3 = 267 | (330+312+309) : 3 = 317 | 0,96             | 0,84          |
|                       | 2,41                                | 2,37                    | 2,38                    | (321+314+340) : 3 = 325    | (284+267+263) : 3 = 271 | (318+312+314) : 3 = 315 | 1,03             | 0,86          |
|                       | 2,42                                | 2,39                    | 2,38                    | (302+312+319) : 3 = 311    | (249+265+240) : 3 = 251 | (332+316+313) : 3 = 320 | 0,97             | 0,78          |
|                       | 2,43                                | 2,38                    | 2,38                    | (327+311+300) : 3 = 313    | (254+258+266) : 3 = 259 | (324+332+318) : 3 = 325 | 0,96             | 0,80          |
|                       | 2,41                                | 2,39                    | 2,39                    | (277+310+312) : 3 = 300    | (271+247+279) : 3 = 266 | (341+314+311) : 3 = 322 | 0,93             | 0,83          |
| Mittel                | 2,42                                | 2,38                    | 2,38                    | 314                        | 264                     | 318                     | 0,99             | 0,83          |
| Variationskoeffizient |                                     |                         |                         | 3,5 %                      | 3,0 %                   | 2,1 %                   | 5,3 %            | 4,8 %         |

Tafel 7 Rohwichte und Druckfestigkeit der Betone (Mittelwerte)

Verhältnisswerte der Druckfestigkeit von 10 cm-Würfeln nach Kochbehandlung (K) oder Warmluftbehandlung (W) zur Druckfestigkeit von 20 cm-Würfeln nach Normallagerung (B). Die Werte für die Reihen Q 2, Q 3, Q 5 und Q 6 stammen aus einer Mischung (je 3 Würfel). Die Werte der Reihen R 1 bis R 6, Q 1 und Q 4 sind die Mittelwerte aus 4 bis 6 Mischungen mit je 3 Würfeln (siehe die Tafeln 5 und 6).

| 1                     | 2       | 3                                      | 4                          | 5          | 6                       | 7                       | 8                       | 9                       | 10                      | 11                      | 12               | 13            |
|-----------------------|---------|--|----------------------------|------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|------------------|---------------|
| Reihe                 | Zement  | Zement-<br>gehalt<br>kg/m <sup>3</sup> | Wasser-<br>zement-<br>wert | Konsistenz | Rohwichte               |                         |                         | Druckfestigkeit         |                         |                         | Verhältnisswerte |               |
|                       |         |  |                            |            | K<br>kp/dm <sup>3</sup> | W<br>kp/dm <sup>3</sup> | B<br>kp/dm <sup>3</sup> | K<br>kp/cm <sup>2</sup> | W<br>kp/cm <sup>2</sup> | B<br>kp/cm <sup>2</sup> | $\frac{K}{B}$    | $\frac{W}{B}$ |
| R 1                   | PZ 275  | rd. 325                                | 0,45                       | steif      | 2,43                    | 2,40                    | 2,40                    | 263                     | 254                     | 466                     | 0,56             | 0,54          |
| R 2                   |         |  | 0,58                       | weich      | 2,40                    | 2,37                    | 2,36                    | 157                     | 158                     | 329                     | 0,48             | 0,48          |
| R 3                   |         |  | 0,70                       | flüssig    | 2,38                    | 2,31                    | 2,30                    | 80                      | 72                      | 197                     | 0,40             | 0,37          |
| R 4                   |         | rd. 250                                | 0,58                       | steif      | 2,43                    | 2,39                    | 2,38                    | 159                     | 167                     | 340                     | 0,47             | 0,49          |
| R 5                   |         | rd. 310                                |                            | weich      | 2,42                    | 2,37                    | 2,37                    | 147                     | 143                     | 318                     | 0,46             | 0,45          |
| R 6                   |         | rd. 360                                |                            | flüssig    | 2,39                    | 2,34                    | 2,34                    | 141                     | 133                     | 303                     | 0,47             | 0,45          |
| Mittel                |         |  |                            |            |                         |                         |                         |                         |                         |                         | 0,47             | 0,46          |
| Variationskoeffizient |         |  |                            |            |                         |                         |                         |                         |                         |                         | 10,9 %           | 12,4 %        |
| Q 1                   | HOZ 275 | rd. 325                                | 0,45                       | steif      | 2,43                    | 2,40                    | 2,40                    | 410                     | 343                     | 423                     | 0,97             | 0,81          |
| Q 2                   |         |  | 0,70                       | weich      | 2,40                    | 2,38                    | 2,36                    | 300                     | 238                     | 298                     | 1,01             | 0,80          |
| Q 3                   |         |  | 0,58                       | flüssig    | 2,37                    | 2,32                    | 2,30                    | 214                     | 162                     | 195                     | 1,10             | 0,83          |
| Q 4                   |         | rd. 250                                | 0,58                       | steif      | 2,42                    | 2,38                    | 2,38                    | 314                     | 264                     | 318                     | 0,99             | 0,83          |
| Q 5                   |         | rd. 310                                |                            | weich      | 2,40                    | 2,38                    | 2,37                    | 264                     | 225                     | 291                     | 0,91             | 0,77          |
| Q 6                   |         | rd. 360                                |                            | flüssig    | 2,39                    | 2,36                    | 2,34                    | 268                     | 210                     | 276                     | 0,97             | 0,76          |
| Mittel                |         |  |                            |            |                         |                         |                         |                         |                         |                         | 0,99             | 0,80          |
| Variationskoeffizient |         |  |                            |            |                         |                         |                         |                         |                         |                         | 6,3 %            | 3,7 %         |

keit der normalgelagerten 20 cm-Würfel veranlaßt (größter Wert 227 kp/cm<sup>2</sup>, kleinster Wert 182 kp/cm<sup>2</sup>).

In der Größe der Streuung unterscheiden sich die Prüfwerte nach beiden Prüfverfahren praktisch nicht.

In gleicher Weise sind die wiederholten Prüfungen der Mischungen Q 1 und Q 4 aus *Hochofenzement* Q in Tarel 6 zusammengestellt worden. Was für die Mischungen R 1 bis R 6 aus *Portlandzement* als wesentlich gefunden wurde, ergab sich ebenso aus den Versuchen mit dem *Hochofenzement*. Die Streuungen (Variationskoeffizienten) der Festigkeiten einzelner Prüfungen sind hier noch kleiner ausgefallen als bei den Reihen mit *Portlandzement* (2,2 % bis 4,0 %).

Schließlich ist festzustellen, daß mit *Hochofenzement* die Verhältniswerte  $K : B$  im Mittel bei 0,98 und  $W : B$  im Mittel bei 0,82 liegen und damit wesentlich größer sind als bei den Mischungen mit *Portlandzement*. Das bedeutet, daß die Erhärtung dieses *Hochofenzements* durch die Wärmebehandlung besonders stark angeregt wurde. Bei der Kochbehandlung (Spalte 8) trat dies noch etwas mehr hervor als bei der Warmluftbehandlung.

## 8.2 Verhältniswerte für unterschiedliche Mischungen aus dem gleichen Zement

In die Tafel 7 sind alle Mischungen aufgenommen worden (siehe auch Übersicht in Abschnitt 2.), also auch die Mischungen, die nur einmal geprüft wurden. Hiernach und nach Bild 5 kann man feststellen, daß überwiegend unabhängig vom Mischungsverhältnis und der Größe der Druckfestigkeit  $B$  im Alter von 28 Tagen nach Normallagerung (Spalte 11) das Verhältnis der Druckfestigkeit  $K$  und  $W$  zu  $B$  sich bei den Mischungen mit gleichem Zement nur wenig unterschied. Bei den Reihen R 1, R 2 und R 3 ist eine Abhängigkeit vom Wasserzementwert zu erkennen (abnehmender Verhältniswert mit zunehmendem Wasserzementwert). Der Variationskoeffizient errechnet sich bei den 6 verschiedenen Mischungen aus *Hochofenzement* für  $K : B$  nur zu 6,3 % und  $W : B$  nur zu 3,7 %. Er erscheint bei den Mischungen aus *Portlandzement* mit 10,9 % und 12,4 % größer, weil hier die Reihe R 3 mit ihren sehr unterschiedlichen 28 Tage-Druckfestigkeiten einbezogen ist (siehe unter 8.1). Sonst liegt nur noch die Reihe R 1 mit ihren Verhältniswerten (0,56 und 0,54) ähnlich weit vom Mittelwert ab (Abhängigkeit vom Wasserzementwert).

Im ganzen kann daraus gefolgert werden, daß über einen ausreichend weiten Bereich der auf der Baustelle um den Sollwert schwankenden Zusammensetzung oder Festigkeit eines Betons die für ihn bei der Eignungsprüfung ermittelte Beziehung zwischen der 24 Stunden-Druckfestigkeit und der 28 Tage-Normaldruckfestigkeit hinreichend gilt.

Wird also bei einer dem Bau vorausgehenden Eignungsprüfung für einen bestimmten Beton neben der verlangten Ermittlung der normalen Druckfestigkeit  $B$  nach 28 Tagen auch die 24 Stunden-Festigkeit ( $K$  oder  $W$ ) bestimmt, so kann später auf der Baustelle ebenfalls durch die gleiche, kurzfristige Prüfung ( $K$  oder  $W$ ) festgestellt werden, wie die erhaltene Frühfestigkeit ( $K$  oder

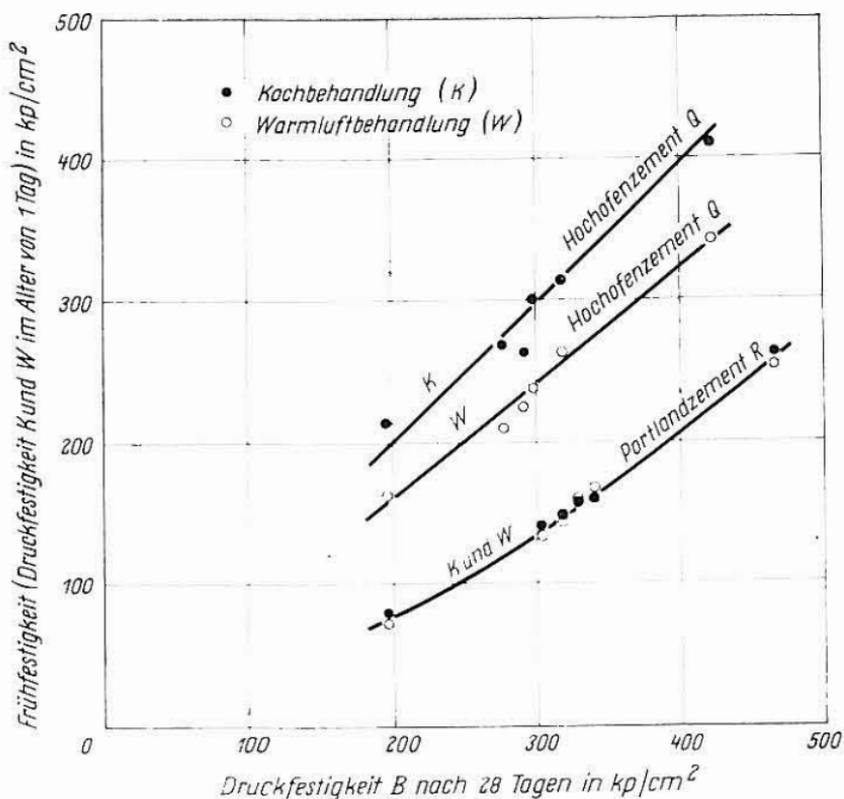


Bild 5 Beziehung zwischen der Druckfestigkeit von 10 cm-Würfeln nach Kochbehandlung (K) oder Warmluftbehandlung (W) im Alter von 1 Tag (Werte aus Tafel 7, Spalten 9 und 10) und der Druckfestigkeit (B) von 20 cm-Würfeln im Alter von 28 Tagen nach Normallagerung (Werte aus Tafel 7, Spalte 11)

W) im Vergleich zu der bei der Eignungsprüfung festgestellten Frühfestigkeit liegt und welche 28 Tage-Normaldruckfestigkeit des Betons bei Umrechnung mit dem Verhältniswert  $K : B$  oder  $W : B$  der Eignungsprüfung zu erwarten ist. Man kann also in Verbindung mit den Feststellungen bei der Eignungsprüfung irgendwelche Festigkeitsänderungen der Mischung auf der Baustelle bereits nach 1 Tag erkennen und u. U. beheben.

### 8.3 Einfluß des Zements bei gleicher Zusammensetzung der Mischung auf den Verhältniswert $K : B$ und $W : B$

In Tafel 8 sind gesondert die Versuchsergebnisse einander gegenübergestellt, die bei der gleichen Mischung, jedoch mit verschiedenen Zementen (PZ R und HOZ Q) erhalten wurden.

Es zeigt sich hier deutlich, daß der Einfluß des Zements auf die Größe des Verhältniswertes  $K : B$  oder  $W : B$  vorherrscht und daß demgegenüber der Einfluß des Prüfverfahrens (K oder W) oder einer etwas unterschiedlichen Mischungszusammensetzung zurücktritt.

Nimmt man das Ergebnis der Prüfungen K und W zusammen, so ist nach den Verhältniswerten in Spalte 8 der Tafel 8 zu folgern, daß verschiedene Zemente sehr unterschiedlich auf eine Wärmebehandlung ansprechen können und daß der

Tafel 8 Betonmischungen gleicher Zusammensetzung aus  
PZ R und HOZ Q

| 1          | 2                 | 3                                      | 4                          | 5               | 6             | 7             | 8                                |
|------------|-------------------|--|----------------------------|-----------------|---------------|---------------|----------------------------------|
| Reihe      | Zement            | Zement-<br>gehalt<br>kg/m <sup>3</sup> | Wasser-<br>zement-<br>wert | Konsi-<br>stenz | $\frac{K}{B}$ | $\frac{W}{B}$ | Mittel aus<br>Spalten<br>6 und 7 |
| R 1<br>Q 1 | PZ 275<br>HOZ 275 | rd. 325                                | 0,45                       | steif           | 0,56<br>0,97  | 0,54<br>0,81  | 0,55 (100 %)<br>0,89 (162 %)     |
| R 2<br>Q 2 | PZ 275<br>HOZ 275 |  |                            |                 | 0,48<br>1,01  | 0,48<br>0,80  | 0,48 (100 %)<br>0,90 (188 %)     |
| R 3<br>Q 3 | PZ 275<br>HOZ 275 |  |                            |                 | 0,40<br>1,10  | 0,37<br>0,83  | 0,38 (100 %)<br>0,96 (253 %)     |
| R 4<br>Q 4 | PZ 275<br>HOZ 275 | rd. 250                                | 0,58                       | steif           | 0,47<br>0,99  | 0,49<br>0,83  | 0,48 (100 %)<br>0,91 (190 %)     |
| R 5<br>Q 5 | PZ 275<br>HOZ 275 | rd. 310                                |                            |                 | 0,46<br>0,91  | 0,45<br>0,77  | 0,46 (100 %)<br>0,84 (183 %)     |
| R 6<br>Q 6 | PZ 275<br>HOZ 275 | rd. 360                                |                            |                 | 0,47<br>0,97  | 0,44<br>0,76  | 0,46 (100 %)<br>0,86 (187 %)     |

Verhältniswert zwischen der Frühfestigkeit nach Wärmebehandlung und der Festigkeit nach Normallagerung für jeden Zement anders ausfallen kann; z. B. war die Frühfestigkeit der Betone aus dem Zement Q um 62 % bis 153 % größer als die der Betone aus dem Zement R.

Es kann daher nicht ein bestimmter, gleicher Verhältniswert zwischen einer solchen Frühfestigkeit nach Wärmebehandlung und der Normalfestigkeit des Betons für beliebige Zemente gelten, weil die Festigkeitsentwicklung bei Wärmebehandlung (Frühfestigkeit) einerseits und Normallagerung andererseits nicht in gleicher Weise durch die chemisch-mineralogischen und physikalischen Eigenschaften des Zements beeinflusst wird und sich einzelne Zemente hierin oft stark unterscheiden. Dies wird besonders aus der Darstellung der Versuchsergebnisse in Bild 5 erkennbar, wonach zu einer gleichen Normdruckfestigkeit B des Betons (Abszisse) je nach Zement sehr verschiedene Frühfestigkeiten nach Wärmebehandlung (K oder W) gehören. Der Hochofenzement mit seinen geringeren Anfangsfestigkeiten bei Normallagerung, aber nahezu gleicher 28 Tage-Normenfestigkeit (Tafel 3) sprach auf eine Wärmebehandlung besonders stark an. Bei ihm wirkte sich auch die intensivere Kochbehandlung noch in einer erhöhten Frühfestigkeit aus, während die Erhärtung des Portlandzements schon durch die mildere Warmluftbehandlung ebenso beschleunigt wurde wie durch die Kochbehandlung. Andererseits ist der Vorschlag von Misch [5] noch weiter zu prüfen, inwieweit für die kurzfristige Beurteilung der Normenfestigkeit von Lieferungen eines Zements ein solches Verfahren ebenfalls geeignet sein könnte; siehe auch [2].

Die Frage ist noch offen, ob die einmal für einen bestimmten Zement aufgestellte Beziehung immer gilt, wenn sich der Zement bei den folgenden Lieferungen (z. B. auch trotz gleicher Normenfestigkeit) in seiner Zusammensetzung in einem gewissen Schwankungsbereich ändert. Würden also die praktisch

Tafel 9 Verhältnis der 1 Tage-Druckfestigkeit W nach Wärmebehandlung zur Druckfestigkeit B im Alter von 28 Tagen nach Wasserlagerung

2 h Vorlagerung bei 20 °C, Temperaturanstieg im Feuchtraum auf 60 °C in 3 h 20 min bzw. auf 80 °C in 5 h, Temperatur von 60 °C während 8 h 10 min bzw. von 80 °C während 3 h, Abkühlen während 4 h 30 min bzw. 8 h; Prüfung nach 24 h

| 1   | 2                               | 3                             | 4                | 5                           | 6                             | 7                | 8                               | 9                             | 10               | 11                          | 12                            | 13               |
|---|---------------------------------|-------------------------------|------------------|-----------------------------|-------------------------------|------------------|---------------------------------|-------------------------------|------------------|-----------------------------|-------------------------------|------------------|
| Zement  | Beton mit Wasserzementwert 0,40 |                               |                  |                             |                               |                  | Beton mit Wasserzementwert 0,50 |                               |                  |                             |                               |                  |
|   | 60 °C                           | 20 °C                         | 60° / 20°        | 80 °C                       | 20 °C                         | 80° / 20°        | 60 °C                           | 20 °C                         | 60° / 20°        | 80 °C                       | 20 °C                         | 80° / 20°        |
|   | 1 Tag<br>kp/cm <sup>2</sup>     | 28 Tage<br>kp/cm <sup>2</sup> | 1/28             | 1 Tag<br>kp/cm <sup>2</sup> | 28 Tage<br>kp/cm <sup>2</sup> | 1/28             | 1 Tag<br>kp/cm <sup>2</sup>     | 28 Tage<br>kp/cm <sup>2</sup> | 1/28             | 1 Tag<br>kp/cm <sup>2</sup> | 28 Tage<br>kp/cm <sup>2</sup> | 1/28             |
| 1 (PZ)  | 353                             | 610                           | 0,58             | 352                         | 589                           | 0,60             | 281                             | 510                           | 0,55             | 288                         | 474                           | 0,61             |
| 2 (PZ)  | 342                             | 538                           | 0,64             | 346                         | 533                           | 0,65             | 244                             | 460                           | 0,53             | 246                         | 431                           | 0,56             |
| 3 (PZ)  | 314                             | 538                           | 0,58             | 316                         | 524                           | 0,60             | 214                             | 418                           | 0,51             | 226                         | 576                           | 0,52             |
| 4 (PZ)  | 358                             | 653                           | 0,55             | 408                         | 674                           | 0,60             | 238                             | 570                           | 0,42             | 272                         | 436                           | 0,47             |
| 5 (PZ)  | 331                             | 653                           | 0,51             | 350                         | 647                           | 0,54             | 211                             | 471                           | 0,45             | 222                         | 463                           | 0,48             |
| 6 (HOZ)   | 355                             | 603                           | 0,59             | 387                         | 578                           | 0,67             | 223                             | 482                           | 0,46             | 256                         | 476                           | 0,54             |
| Mittelwert<br>Zemente 1 bis 5                                   |                                 |                               | 0,57             |                             |                               | 0,60             |                                 |                               | 0,49             |                             |                               | 0,53             |
| größte absolute Abweichung<br>vom Mittelwert<br>Zemente 1 bis 5 |                                 |                               | + 0,07<br>- 0,06 |                             |                               | + 0,05<br>- 0,06 |                                 |                               | + 0,06<br>- 0,07 |                             |                               | + 0,08<br>- 0,06 |

nicht ganz zu vermeidenden geringen Schwankungen im chemisch-mineralogischen und physikalischen Aufbau eines Zements den Verhältniswert zwischen Frühfestigkeit nach Warmbehandlung und Normalfestigkeit wesentlich verändern, so würde keine Verbindung mehr zur ursprünglichen Beziehung  $K : B$  oder  $W : B$  bestehen und kein Rückschluß oder Vergleich von der Frühfestigkeit aus mehr möglich sein.

Bei früheren Untersuchungen wurden in anderem Zusammenhang u. a. die 1 Tage-Festigkeiten von Beton aus 6 verschiedenen Zementen nach einer Wärmebehandlung bei  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$  und  $80\text{ }^{\circ}\text{C}$  und die Festigkeiten nach 28 Tagen ermittelt [8]. Die hier interessierenden Versuchsergebnisse sind in Tafel 9 zusammengefaßt. Die 5 Portlandzemente 1 bis 5 unterschieden sich in ihrem rechnerischen Gehalt an Klinkerphasen und auch in der Mahlfineinheit zum Teil erheblich. Diese Unterschiede der chemisch-mineralogischen und physikalischen Eigenschaften zwischen den verschiedenen Zementen sind größer als die Schwankungen, die bei den einzelnen Lieferungen eines Zements über längere Zeit anzunehmen sind. Es würde hier zu weit führen, alle Kennwerte für die untersuchten Zemente anzuführen; siehe dazu die Tafeln 1 und 2 in [8]. Zur Kennzeichnung sei lediglich hervorgehoben, daß die rechnerische Zusammensetzung der Zemente 1, 2 und 3 sich in folgender Weise unterschied ( $C_3A = 13\%$ ,  $12\%$ ,  $10\%$ ;  $C_3S = 45\%$ ,  $46\%$ ,  $50\%$ ;  $C_2S = 26\%$ ,  $20\%$ ,  $23\%$ ). Hiervon wich der Zement 4 mit einem  $C_3S$ -Gehalt von  $39\%$  und Zement 5 mit einem  $C_3A$ -Gehalt von  $0\%$  stark ab. Die Mahlfineinheit lag zwischen  $1,6$  und  $7,8\%$  R  $0,09\text{ mm}$ , die Normdruckfestigkeit nach 3 Tagen zwischen  $184$  und  $264\text{ kp/cm}^2$  und nach 28 Tagen zwischen  $426$  und  $603\text{ kp/cm}^2$ .

In den Spalten 4, 7, 10 und 13 der Tafel 9 sind die Verhältniswerte „1/28“ aus der 1 Tage-Frühfestigkeit nach Wärmebehandlung und der 28 Tage-Druckfestigkeit nach Wasserlagerung bei  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  für die zwei verschiedenen Mischungen mit  $w = 0,40$  und  $w = 0,50$  sowie für die beiden bei der Wärmebehandlung angewandten Temperaturen von  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$  und  $80\text{ }^{\circ}\text{C}$  aufgeführt. Vergleicht man die Verhältniswerte in den 4 Versuchsreihen mit je 5 verschiedenen Portlandzementen, so stellt man fest, daß die Verhältniswerte in den einzelnen Versuchsreihen um  $0,11$  bis  $0,14$ , das sind  $18$  bis  $26\%$  bezogen auf den zugehörigen Mittelwert der Versuchsreihe, voneinander abweichen. Hieraus ist wenigstens zu folgern, daß auch für Zemente gleicher Art nicht derselbe Verhältniswert verwendet werden kann.

#### **8.4 Beziehung zwischen der Druckfestigkeit des 10 cm-Würfels und 20 cm-Würfels nach Normallagerung im Alter von 28 Tagen**

Die Feststellungen hierüber ergaben sich nebenbei und gehören nicht zur eigentlichen Versuchsaufgabe. Doch sollen sie in Tafel 10 wiedergegeben werden, weil immer wieder der in DIN 1048, § 8, Ziffer 2, angegebene Wert von  $15\%$  für die höhere mit dem 10 cm-Würfel erhaltene Druckfestigkeit  $B_{10}$  als zu groß angesehen wird.

Man findet aus Spalte 11 der Tafel 10, daß das Gesamtmittel für die am 10 cm-Würfel geprüften Druckfestigkeiten um  $14\%$

Tafel 10 Druckfestigkeit der 10 cm-Würfel (B 10) und der 20 cm-Würfel (B 20) nach 28 Tagen

Lagerung bei 20 °C, 7 Tage unter nassen Tüchern und 21 Tage an der Luft von 65 % relativer Luftfeuchtigkeit

| 1                     | 2       | 3                                      | 4                          | 5          | 6                                  | 7                | 8  | 9   | 10               | 11   |
|-----------------------|---------|--|----------------------------|------------|------------------------------------|------------------|--|---|------------------|--|
| Reihe                 | Zement  | Zement-<br>gehalt<br>kg/m <sup>3</sup> | Wasser-<br>zement-<br>wert | Konsistenz | Rohwichte<br>in kp/dm <sup>3</sup> |                  | Verhält-<br>niswert<br>$\frac{R\ 10}{R\ 20}$ | Druckfestig-<br>keit<br>in kp/cm <sup>2</sup> |                  | Verhält-<br>niswert<br>$\frac{B\ 10}{B\ 20}$ |
|                       |         |  |                            |            | 10 cm-<br>Würfel                   | 20 cm-<br>Würfel |  | 10 cm-<br>Würfel                              | 20 cm-<br>Würfel |  |
|                       |         |  |                            |            | R 10                               | R 20             | B 10   | B 20  |                  |  |
| R 1                   | PZ 275  | rd. 325                                | 0,45                       | steif      | 2,40                               | 2,40             | 1,00   | 546   | 466              | 1,17   |
| R 2                   |         |  | 0,58                       | weich      | 2,36                               | 2,36             | 1,00   | 386   | 329              | 1,17   |
| R 3                   |         |  | 0,70                       | flüssig    | 2,29                               | 2,30             | 1,00   | 222   | 197              | 1,13   |
| R 4                   |         | rd. 250                                | 0,58                       | steif      | 2,39                               | 2,38             | 1,00   | 395   | 340              | 1,16   |
| R 5                   |         | rd. 310                                | 0,58                       | weich      | 2,37                               | 2,37             | 1,00   | 370   | 318              | 1,16   |
| R 6                   |         | rd. 360                                | 0,58                       | flüssig    | 2,32                               | 2,34             | 0,99   | 344   | 303              | 1,14   |
| Mittel                |         |  |                            |            |                                    |                  | 1,00   |   |                  | 1,16   |
| Q 1                   | HOZ 275 | rd. 325                                | 0,45                       | steif      | 2,41                               | 2,40             | 1,00   | 481   | 423              | 1,14   |
| Q 2                   |         |  | 0,58                       | weich      | 2,36                               | 2,36             | 1,00   | 316   | 298              | 1,06   |
| Q 3                   |         |  | 0,70                       | flüssig    | 2,31                               | 2,30             | 1,00   | 220   | 195              | 1,13   |
| Q 4                   |         | rd. 250                                | 0,58                       | steif      | 2,39                               | 2,38             | 1,00   | 360   | 318              | 1,13   |
| Q 5                   |         | rd. 310                                | 0,58                       | weich      | 2,38                               | 2,37             | 1,00   | 327   | 291              | 1,12   |
| Q 6                   |         | rd. 360                                | 0,58                       | flüssig    | 2,34                               | 2,34             | 1,00   | 303   | 276              | 1,10   |
| Mittel                |         |  |                            |            |                                    |                  | 1,00   |   |                  | 1,12   |
| Gesamtmittel          |         |  |                            |            |                                    |                  | 1,00   |   |                  | 1,14   |
| Variationskoeffizient |         |  |                            |            |                                    |                  | 0 %  |   |                  | 2,8 %  |

über der Druckfestigkeit der zugehörigen 20 cm-Würfel lag. In der Regel fand sich eine um 10 % bis 17 % höhere Druckfestigkeit. Nur in einem Fall lag die Erhöhung bei nur 6 % (Reihe Q 2), ohne daß für diese Ausnahme eine Begründung gegeben werden kann.

## 9. Beurteilung der beiden Verfahren K und W

Aus Tafel 7 geht hervor, daß die Frühfestigkeit der Betone aus dem *Portlandzement* mit der Koch- und Warmluftbehandlung praktisch gleich groß entstand (siehe auch Bild 5). Dagegen lieferte die intensivere Kochbehandlung (K) beim Beton aus dem *Hochofenzement* im Mittel eine um 18 % höhere Druckfestigkeit als die Warmluftbehandlung (W). Dies ist jedoch für die Beurteilung der beiden Verfahren ohne Bedeutung. Wesentlich hierfür sind die Streuungen bei wiederholter Prüfung (Tafeln 5 und 6). Die Variationskoeffizienten, die sich für die Druckfestigkeit des wiederholt geprüften Betons nach der Kochbehandlung oder Warmluftbehandlung errechnen, liegen nur wenig auseinander (im ungünstigsten Falle – wieder bei Reihe R 3 – ist der Unterschied 3,4 %).

Man könnte also, wenn Gleichmäßigkeit der Prüfwerte für die Wahl des Verfahrens entscheidend wäre, das Verfahren K oder

W benutzen. Vom Verfahren her gesehen, erscheint jedoch die Wärmebehandlung im Wärmeschrank (Verfahren W) auf der Baustelle einfacher durchführbar, weil die Lagerung im Wärmeschrank (üblicher Trockenschrank) weniger Wartung erfordert. Demgegenüber ist bei der Kochbehandlung (K) wiederholt heißes Wasser nachzufüllen und – u. U. wie beim gewählten Vorgehen – auch die Einregelung der Heizung in der ersten Stunde zu beachten.

Andererseits sind die Anschaffungskosten für den Wärmeschrank mit Ventilator höher als für die Geräte der Kochbehandlung. In jedem Falle ist es aber angezeigt, daß zur Wärmebehandlung bei der vorausgehenden Eignungsprüfung immer das gleiche Verfahren und möglichst auch die gleichen Geräte benutzt werden wie bei der späteren Überwachung auf der Baustelle. Ist dies – ausnahmsweise – nicht möglich, so muß wenigstens der gleiche Temperaturverlauf gewährleistet sein (siehe z. B. Bilder 2 und 4).

Durch weitere Versuche sollte geklärt werden, ob man ohne besondere Vorlagerung, wie bei den englischen Versuchen [5, 6], auskommen und ob man, falls dies praktisch einfacher ist, sofort nach der Warmluftbehandlung prüfen kann. Dabei dürften nicht beherrschbare Einflüsse, die den zugehörigen, für einen Zement zugrunde gelegten Verhältniswert  $W : B$  verändern können, nicht stärker hervortreten als dies hier beim Verfahren W mit 2stündiger Vorlagerung und langsamem Abkühlen der Fall ist.

Beim Verfahren W ist, abweichend von unserem Vorgehen, auf alle Fälle zu empfehlen, die freie Fläche unmittelbar mit einer Plastikfolie abzuschließen und darauf eine Stahlplatte zu legen, die bis an die äußeren Formkanten reicht. Damit sollen das Verdampfen von Wasser aus dem Würfel und unterschiedliches Verdampfen bei einzelnen Würfeln vermindert werden, ohne daß der Beton direkt belastet wird.

## 10. Folgerungen

Die Untersuchungen erlauben die nachstehenden Folgerungen, die in erster Linie für die hier vorliegenden Verhältnisse gelten, zum Teil aber auch eine allgemeinere Übertragung zulassen.

10.1 Die Beurteilung der Betongüte durch eine Frühfestigkeit, die nach einer bestimmten Kochbehandlung (K) oder Wärmebehandlung (W) nach 24 h erhalten wird, erscheint unter gewissen Voraussetzungen zuverlässig möglich.

10.2 Dazu ist es nötig, bei der ohnehin meist vorgeschriebenen Eignungsprüfung für die betreffende Betonmischung neben der 28 Tage-Druckfestigkeit (B) auch die Frühfestigkeit nach einer Wärmebehandlung (K oder W) zu bestimmen.

10.3 Der Verhältniswert  $K : B$  oder  $W : B$  wird durch begrenzte Schwankungen in der Zusammensetzung einer Betonmischung wenig beeinflusst, so daß bei gleichbleibendem Beton von der beim Betonieren für die laufenden Mischungen ermittelten Frühfestigkeit  $W$  über den vorher bei der Eignungsprüfung festgelegten Verhältniswert  $W : B$  spätestens nach

1 Tag auf die nach 28 Tagen zu erwartende Betondruckfestigkeit B geschlossen werden kann.

10.4 Die absolute Abweichung der Einzelwerte vom Mittelwert der drei zusammengehörenden Würfel war bei der Frühfestigkeit der 10 cm-Würfel nach Kochbehandlung (K) oder Warmluftbehandlung (W) nicht größer als nach DIN 1048 für die 28 Tage alten 20 cm-Würfel der Eignungsprüfung zulässig (15 %).

10.5 Der Variationskoeffizient der Frühfestigkeiten K und W lag bei den zu verschiedenen Zeiten wiederholten Prüfungen der verschiedenen Mischungen zwischen 2,2 % und 8,2 %, der Variationskoeffizient der zugehörigen 28 Tage-Festigkeiten B bei der Prüfung der 20 cm-Würfel zwischen 1,7 % und 11,4 %.

10.6 Die Verhältnismerte  $K : B$  und  $W : B$  fanden sich für 5 verschiedene Betone aus dem *Portlandzement R* (Tafel 5, ohne Reihe R 3) im Mittel zwischen 0,44 und 0,56 und der Variationskoeffizient für den Verhältnismerte zwischen 3,7 % und 9,3 %.

10.7 Beim Beton aus *Hochofenzement Q* wurde der Verhältnismerte  $K : B$  zu 0,98 und  $W : B$  zu 0,82 erhalten (Tafel 6). Die Frühfestigkeit der 10 cm-Würfel ist demnach mit diesem Zement nach der Kochbehandlung etwa ebenso groß ausgefallen wie die Normaldruckfestigkeit (20 cm-Würfel, Alter 28 Tage). Der Variationskoeffizient für  $K : B$  und  $W : B$  war bei wiederholter Prüfung sehr günstig (4,6 % bis 5,5 %).

10.8 Nach Normallagerung wurde im Alter von 28 Tagen die Druckfestigkeit von 10 cm-Würfeln im Mittel um 14 % größer erhalten als die der 20 cm-Würfel, also entsprechend dem Richtwert in DIN 1048 (15 %).

10.9 Zur Erlangung einer Frühfestigkeit erscheint für die Praxis die Warmluftbehandlung (W) der 10 cm-Würfel im Wärmeschrank (Trockenschrank) einfacher anwendbar als die Kochbehandlung (K).

10.10 Weitere Untersuchungen erscheinen angezeigt über:  
die Abhängigkeit des Verhältnismertes  $W : B$  von der Zusammensetzung eines Zements, von seinem Alter und von seiner Mahlfeinheit (Versuche an Zementen mit unterschiedlicher Normfestigkeit und Herkunft);  
den Einfluß unterschiedlich langer Vorlagerung der 10 cm-Würfel;  
Einflüsse bei einer Prüfung, die unmittelbar auf die Wärmebehandlung folgt (mögliche Streuungen durch Temperaturspannungen).

Anmerkung:

Nach Drucklegung stellten wir fest, daß 1933 eine Veröffentlichung mit entsprechender Themenstellung erschienen ist: Patch, O. G.: An 8-hour accelerated strength test for field concrete control. Proc. Amer. Concr. Inst. 29 (1932/33) S. 318/324.

## SCHRIFTTUM :

- [1] Bates, P. H., and R. L. Blaine: Notes on hardening cements at the boiling point of water. Proc. Amer. Concr. Inst. 28 (1932) S. 531/535.
- [2] Eidg. Materialprüfungs- und Versuchsanstalt: Ein Verfahren zur beschleunigten Prüfung der Portlandzemente auf ihre Festigkeitsentwicklung. Schweizer Archiv 23 (1957) Nr. 3, S. 65/70; Nr. 4, S. 115/121; Nr. 5, S. 146/156.
- [3] Keil, F., und A. Narjes: Über den Einfluß der Dampfbehandlung auf Zementklinker verschiedener Zusammensetzung. Zement-Kalk-Gips 12 (1959) H. 4, S. 129/136.
- [4] Keil, F., und H. Mathieu: Normenprüfung, Kleinprüfung, Schnellprüfung. Zement-Kalk-Gips 11 (1958) H. 3, S. 81/86.
- [5] Gregory, J. M.: An accelerated test for determining the strength of concrete. Dep. of Scient. and Industr. Res., Road Res. Laboratory. Res. Note No. RN/2953/JMG, Febr. 1957. — Siehe Ref. von Misch, P.: Kurzversuch zur Bestimmung der Würfeldruckfestigkeit. Beton- und Stahlbetonbau 55 (1960) H. 1, S. 21/22.
- [6] King, J. W. H.: Concrete quality control: A technique of accelerated testing development at Queen Mary College for the Port of London Authority. Chartered Civil Engineer. Nov. 1955, S. 46/48. — Entsprechend siehe Ordmann, N.N.B., and N.G. Bondre: Accelerated curing tests on concrete. Engineering 185 (1958) No. 4798, S. 243/245.
- [7] Smith, L. M.: Determination of strength characteristics of cements. Dep. of Scient. and Industr. Res., Rep. No. D.L. 2032; New Zealand 1960.
- [8] Walz, K.: Der Einfluß einer Wärmebehandlung auf die Festigkeit von Beton aus verschiedenen Zementen. Betontechnische Berichte 1960. Beton-Verlag, Düsseldorf, S. 29/57; ebenso beton 10 (1960) H. 5, S. 222/232.
- [9] Walz, K., und J. Bonzel: Festigkeitsentwicklung verschiedener Zemente bei niedrigerer Temperatur. beton 11 (1961) H. 1, S. 35/48.
- [10] Knubben, L.: Die statistische Auswertung der Festigkeitsprüfung von Mörtel und Beton. Betontechnische Berichte 1960. Beton-Verlag, Düsseldorf, S. 91/100 (beton 10 [1960] H. 8, S. 383/386).