

Über die neuere zement- und betontechnische Entwicklung *)

Von Justus Bonzel, Düsseldorf

Übersicht

Beton wird als Zweistoffsystem aus Zementstein und Zuschlag, d. h. als verleimtes Zuschlaggerüst, angesehen. Seine wesentlichsten Einflußgrößen sind bei vollständiger Verdichtung die Eigenschaften des Zementsteins, die Eigenschaften des Zuschlags und die Haftung zwischen Zementstein und Zuschlag. Diese drei Einflußgrößen wirken sich in den Betoneigenschaften verschieden aus. Bei üblichem Beton werden die Festigkeiten und alle Eigenschaften, die Dichtigkeit voraussetzen, in erster Linie von den Eigenschaften des Zementsteins und die Verformungen etwas mehr auch von den Eigenschaften des Zuschlags bestimmt.

Nach statistischen Überlegungen erscheint es notwendig, die Betongüte auf eine Mindestfestigkeit, z. B. die 5 %-Fraktile, abzustimmen. Das sichere Erreichen einer bestimmten Festigkeit, für deren Gewährleistung sich im Grundsatz zwei Wege anbieten, und die mehr und mehr geforderte Gleichmäßigkeit des Betons setzen möglichst gleichbleibende Ausgangsstoffe und Mischungszusammensetzungen voraus. Für die Dichtigkeit des Betons und die davon abhängigen Eigenschaften, wie z. B. Wasserundurchlässigkeit, Frostwiderstand und chemische Widerstandsfähigkeit, lassen sich aus umfassenden Untersuchungen und Erfahrungen Richtwerte für die Betonzusammensetzung und Kennwerte für die Nachprüfung der Betoneigenschaften angeben. Ein zuverlässiger Rostschutz der Bewehrung kann durch Vermeidung korrosionsfördernder Zusätze und durch Bedingungen für den Mindestzementgehalt, den Wasserzementwert und die Mindestbetondeckung der Bewehrung gesichert werden.

1. Allgemeines

Der Baustoff Beton hat in seiner Geschichte so manche Entwicklungsstufe durchgemacht. Obwohl Zement, Zuschlag und Wasser auch heute noch die Hauptbestandteile des Betons bei der Herstellung sind, wird er als Zweistoffsystem angesehen. Man spricht

*) Nach einem Vortrag auf der technisch-wissenschaftlichen Zementtagung 1966 des Vereins Deutscher Zementwerke in München.

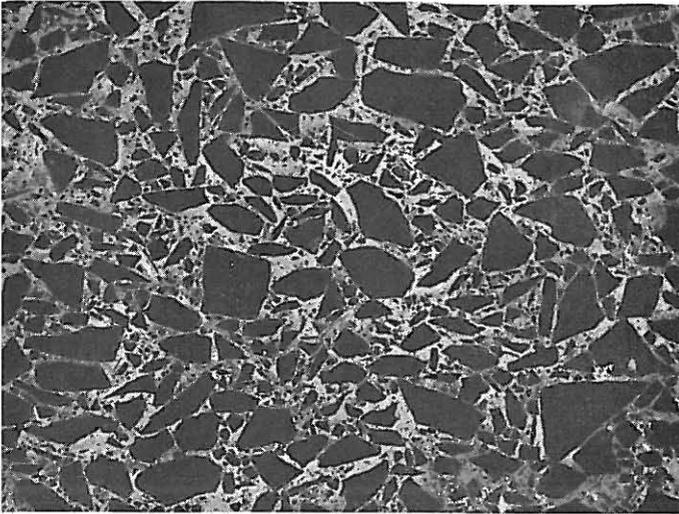


Bild 1 Basaltbeton mit 15 mm Größtkorn, Druckfestigkeit 1430 kp/cm², Spaltzugfestigkeit 91 kp/cm² [1]

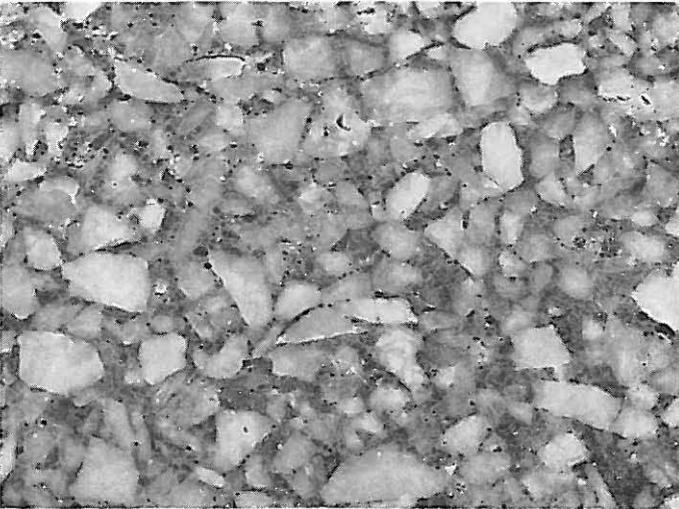


Bild 2 Quarzbeton mit 15 mm Größtkorn, Druckfestigkeit 1229 kp/cm², Spaltzugfestigkeit 61 kp/cm² [1]

beim Frischbeton von Zementleim und Zuschlag und beim erhärteten Beton von Zementstein und Zuschlag. Das bedeutet, daß man sich unter Beton ein verleimtes Zuschlaggerüst vorstellt. Vom Holzbau her ist bekannt, daß die Güte einer Verleimung von der Güte des Leimes, von der Dicke der Leimschichten und von der Haftung zwischen Leim und den zu verklebenden Flächen abhängt

und daß die Verleimung fester wird, wenn sie unter Druck aushärtet. Ähnliche Überlegungen können auch bei Beton angestellt werden. Was erreichbar ist, wenn Beton unter Auflast oder Druck verdichtet wird und erhärtet, zeigen die Bilder 1 und 2 [1]. Bis zum Alter von 42 Tagen erreichte der Basaltbeton eine Druckfestigkeit von 1430 kp/cm^2 und der Quarzbeton eine Druckfestigkeit von 1229 kp/cm^2 . Die zugehörige Spaltzugfestigkeit betrug 91 bzw. 61 kp/cm^2 .

Das Zweistoffsystem läßt auch die wesentlichsten Einflußgrößen für die Betoneigenschaften erkennen. Bei Beton mit geschlossenem Gefüge (vollständige Verdichtung) sind dies:

- a) die Eigenschaften des Zementsteins,
- b) die Eigenschaften des Zuschlags,
- c) die Haftung zwischen Zementstein und Zuschlag.

Dies bedeutet nicht, daß die früher herausgestellten Einflußgrößen bedeutungslos geworden sind. Mit dieser Darstellung können aber die technologischen Zusammenhänge vollständiger aufgedeckt und kann das Zustandekommen der Betoneigenschaften sinnvoller erklärt werden. Dies wiederum ermöglicht eine genauere und sicherere Betonherstellung und eine bessere Ausnutzung des Betons. Einige früher besonders herausgestellte Einflußgrößen haben damit eine etwas andere Bedeutung bekommen. Die Kornzusammensetzung des Zuschlags z. B. verändert bei richtiger Anwendung nur den erforderlichen Zementgehalt (Zementleimenge) und die unmittelbar davon abhängigen Betoneigenschaften (wie z. B. die Wärmeentwicklung bei massigen Bauteilen).

Die Bedeutung der drei Einflußgrößen (Zementstein, Zuschlag, Haftung) ist nicht gleich für alle Betoneigenschaften. Die Beeinflussungsmöglichkeiten lassen sich jedoch an drei Eigenschaften erläutern, auf die sich die meisten Betoneigenschaften ganz oder teilweise zurückführen lassen:

- a) Festigkeit,
- b) Verformung,
- c) Dichtigkeit.

2. Druckfestigkeit

Als Beispiel für die Festigkeit sei die Druckfestigkeit herausgestellt. Sie ist trotz aller Sondereigenschaften meist die wichtigste, aber auch die typischste Eigenschaft des Betons. Der Beton wird daher auch nach seiner Druckfestigkeit in Güteklassen eingeteilt.

2.1 Betrachtung zur Druckbeanspruchung

In einem Konglomerat wie Beton ist der Kräfteverlauf recht kompliziert und abhängig davon, welche Unterschiede in der Festigkeit und im Verformungsvermögen zwischen Zementstein und Zuschlag bestehen und wie groß die Haftung zwischen beiden ist. Bei einfacher Darstellung darf man für Beton aus üblichen Zuschlagstoffen – d. h. Zuschlagstoffen, die wesentlich fester als der Zementstein sind – annehmen, daß die Druckkräfte im wesent-

lichen als Stützkkräfte vom Zuschlaggerüst aufgenommen werden. Durch schräge Stützkkräfte und durch Querverformungen entstehen dabei aber auch Schub- und Zugkräfte, die zum Bruch eines Prüfkörpers führen, sobald sie vom Zementstein bzw. von der Haftung zwischen Zementstein und Zuschlag nicht mehr aufgenommen werden können. Andere Verhältnisse liegen vor, wenn die Festigkeit der Zuschlagstoffe geringer ist als die des Zementsteins, wie z. B. bei Leichtbeton mit geschlossenem Gefüge. Der Bruch wird in diesem Fall eingeleitet werden, wenn die Zuschlagstoffe versagen, vgl. auch [2].

Der Einfluß der Haftung zwischen Zementstein und Zuschlag auf die Betonfestigkeit ist abhängig von den Eigenschaften des Zementsteins und von der Oberflächenbeschaffenheit der Zuschlagstoffe. Bei Beton mit dünnen Zementsteinschichten, die meist vorausgesetzt werden können, ist auch die Kornform des Zuschlags von Bedeutung, da längliche Zuschlagstoffe bei vollständiger Verdichtung des Betons die Verzahnung wesentlich verbessern. Nach neueren Versuchen [3] soll der Einfluß der Haftung auf die Betonfestigkeit bis zu 50 % des Einflusses der Zementsteinfestigkeit ausmachen können. Die dabei vernachlässigten Verzahnungseffekte – es wurden nur in einer Ebene liegende Haftflächen zwischen Zuschlag und Zementstein geprüft – dürften den Einfluß der Haftung jedoch wesentlich herabsetzen. Der Einfluß der Haftung wird sich im allgemeinen nur stärker auswirken, wenn Zuschlagstoffe mit sehr glatter Oberfläche und wasserreichere Betone verwendet werden.

2.2 Einige Einflußgrößen

2.2.1 Zementstein, W/Z-Wert

Da die Festigkeit eines Konglomerates im wesentlichen von der Festigkeit des schwächsten Gliedes abhängt, wird die Betondruckfestigkeit bei üblichen Zuschlagstoffen im wesentlichen von der Festigkeit des Zementsteins bestimmt. A. Hummel [4] faßte diese Erkenntnisse in eine Gleichung, vgl. Bild 3. Sie besagt, daß die Druckfestigkeit des Betons von der Zementsteindichte d und von

$$\text{Betondruckfestigkeit } D = 2,7 \cdot N_p (d - 0,23)$$

N_p = Normendruckfestigkeit des Zementes

$$\text{Zementsteindichte } d = \frac{\frac{1}{\gamma_{oZ}} + \frac{W}{Z} \text{ gebunden}}{\frac{1}{\gamma_{oZ}} + \frac{W}{Z}}$$

γ_{oZ} = Reindichte des Zementes

Bild 3 Gleichung für die Vorausbestimmung der Betondruckfestigkeit [4]

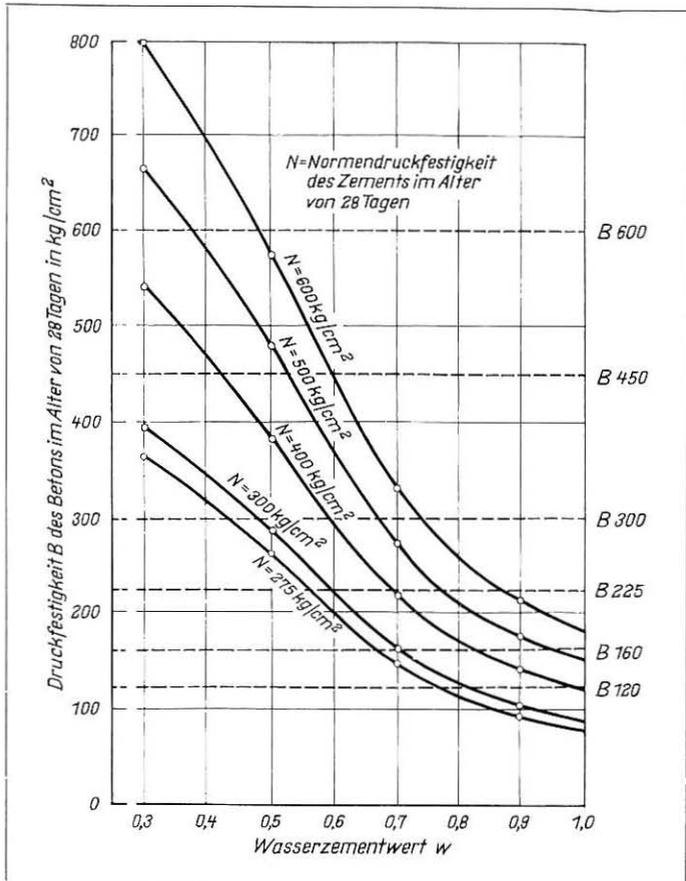


Bild 4 Betondruckfestigkeit in Abhängigkeit von W/Z-Wert und Zementnormendruckfestigkeit [5]

der Zementnormfestigkeit N_p abhängig ist. Die zweite Gleichung drückt aus, daß die Zementsteindichte vom W/Z-Wert und vom Hydratationsgrad des Zementsteins bestimmt wird. Für die praktische Anwendung haben sich Kurvendarstellungen bewährt, aus denen man in Abhängigkeit von W/Z-Wert und Zementnormfestigkeit gleich die Betondruckfestigkeit abgreifen kann, siehe u. a. [5, 6]. Bild 4 zeigt diese Abhängigkeit nach K. Walz [5]. In Bild 5 ist die Betondruckfestigkeit ebenfalls in Abhängigkeit vom W/Z-Wert für Betone aus sehr verschiedenen Zementen aufgetragen, und zwar gemittelt aus Werten verschiedener Altersstufen zwischen 3 und 180 Tagen und in Prozent der Werte bei $W/Z = 0,45$. Die Darstellung besagt, daß Beton mit $W/Z = 0,60$ rund 75 % und Beton mit $W/Z = 0,80$ rund 50 % der Druckfestigkeit von sonst gleichem Beton mit $W/Z = 0,45$ besitzt und daß dies im Mittel für sehr verschiedene Zemente und für Altersstufen zwischen 3 und 180 Tagen gilt [6].

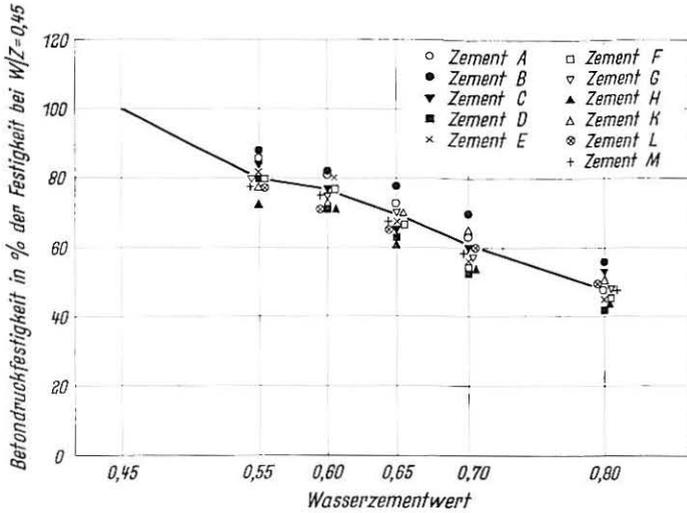


Bild 5 Betondruckfestigkeit in % der Festigkeit bei W/Z = 0,45 in Abhängigkeit vom W/Z-Wert [6]

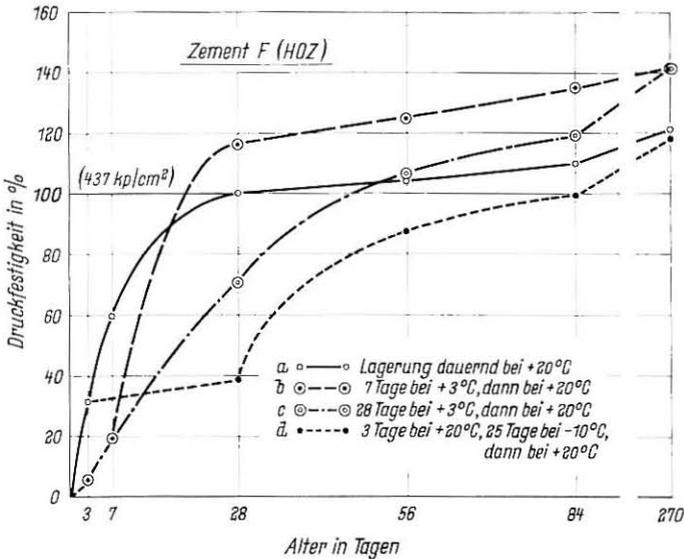


Bild 6 Druckfestigkeit von Zementmörtel in Abhängigkeit von Alter und Lagerung [7]

2.2.2 Temperatur

Wie andere chemische Vorgänge wird auch die Erhärtung des Zementsteins und des Betons unter sonst gleichen Bedingungen grundsätzlich durch höhere Temperaturen beschleunigt und durch niedrigere Temperaturen verzögert. Über diese Erkenntnisse hinaus, die beim Betonieren bei niedrigeren Temperaturen zu berücksichtigen sind,

sichtigen sind und bei Wärmebehandlungen genutzt werden, können sich aber niedrigere Temperaturen günstig auf die Druckfestigkeit auswirken, da sie die Struktur der Neubildungen bei der Hydratation günstig beeinflussen [7]. Nach neueren Untersuchungen [8] bilden sich bei der Erhärtungsverzögerung längere Calciumsilicathydrate, die ineinanderwachsen und sich verflechten und damit ein steiferes Gerüst bilden. Wie Bild 6 zeigt, erreichen dadurch Mörtel mit langsam erhärtenden Zementen, die anfangs bei niedrigen Temperaturen und anschließend bei 20 °C gelagert werden, bei Feuchthaltung eine deutlich höhere Druckfestigkeit als gleich alte Mörtel, die ständig bei 20 °C lagern. Die Festigkeitsunterschiede sind hier so ausgeprägt, weil die Erhärtung solcher Zemente bei niedrigerer Temperatur stärker verzögert wird. Auch aus diesem Grunde kann der oft angenommene Zusammenhang zwischen Festigkeit und Reife – einem Produkt aus Alter und Temperatur [7] – nur sehr beschränkte Gültigkeit haben.

Die gleiche Auswirkung kann auch bei anderer Art der Erhärtungsverzögerung beobachtet werden, wie z. B. infolge Zugabe eines Erhärtungsverzögerers.

2.2.3 Dicke der Zementsteinschichten

Die Betondruckfestigkeit ist in geringem Maße auch abhängig von der Dicke der Zementsteinschichten bzw. von der Zementleimmenge bei gleicher Oberfläche des Zuschlags. In Bild 7 sind einige Ergebnisse neuerer Versuche aufgetragen, auf der Ordinate die Druckfestigkeit und auf der Abszisse die aus den Daten der Betonzusammensetzung errechnete Zementsteinschichtdicke. Bei diesen Versuchen lag der Zementgehalt zwischen 200 und 450 kg/m³ und der W/Z-Wert zwischen 0,40 und 0,80, die Kornzusammensetzung des Zuschlags entsprach den Sieblinien D, D/E, E und E/F der DIN 1045. Danach nimmt die Betondruckfestigkeit mit wachsender Schichtdicke des Zementsteins ab.

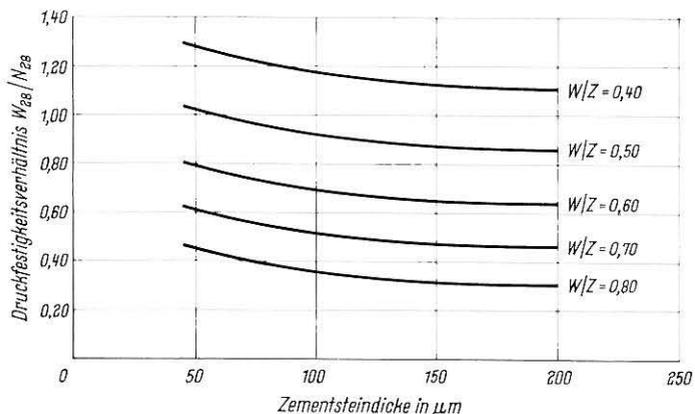


Bild 7 Verhältniswert zwischen Betondruckfestigkeit und Zementnormendruckfestigkeit in Abhängigkeit von der errechneten Zementsteinschichtdicke

Diese Abnahme kann bei großen Zementleimmengen-Unterschieden 10 bis 15 % ausmachen, ist aber im Bereich üblicher Zementgehalte vernachlässigbar klein. Sie ist erklärbar mit der Gestaltungsabhängigkeit der Druckfestigkeit der Zementsteinschicht.

2.2.4 Zement

Neben dem W/Z-Wert und dem Hydratationsgrad geht die Normenfestigkeit des Zements in die Betondruckfestigkeit ein (vgl. Bilder 2 und 3). Für Beton bestimmter Güte oder Druckfestigkeit ist in der Regel die 28 Tage-Druckfestigkeit des Zements von Bedeutung, da nur damit eine sinnvolle Ausnutzung des Zements und des Betons möglich ist. Für frühzeitiges Ausschalen, für Vorspannen und nötigenfalls zur Kennzeichnung des Erhärtungsverlaufes ist aber auch noch eine Druckfestigkeitsangabe in jungem Alter erforderlich. Bild 8 zeigt einige Ergebnisse neuerer Versuche über den Einfluß der Erhärtungsgeschwindigkeit von sehr verschiedenen Zementen auf die Betondruckfestigkeit [6]. Beton mit W/Z-Werten zwischen 0,45 und 0,80 erreichte im Alter von 3 Tagen bei schnell erhärtenden Zementen rund 70 %, bei langsam erhärtenden Zementen rund 20 bis 40 % und bei allen übrigen Zementen rund 50 bis 60 % seiner 28 Tage-Druckfestigkeit. Auch für die übrigen Altersstufen können aus Bild 8 entsprechende Werte entnommen werden. Erwähnenswert ist die Nacherhärtung der Betone mit langsam erhärtenden Zementen, die im Alter von 180 Tagen bis zu 150 % betrug.

In der derzeit gültigen Zementnorm werden für den Zement in Abhängigkeit von der Güteklasse Mindestfestigkeiten gefordert. Es ist bekannt, daß die tatsächlichen Druckfestigkeiten wenigstens der Zemente Z 275 teilweise mehr oder weniger weit über diesen Mindestfestigkeiten liegen. Man ist zunächst geneigt anzunehmen, daß Überfestigkeiten des Zements kein Nachteil sind, zumal die Bauindustrie ja auch mit den höheren Zementfestigkeiten arbeitet. Für den Betonhersteller kann es sich aber als Nachteil auswirken,

| <i>Zement</i> | <i>Betondruckfestigkeit in % der 28 Tage-Werte</i> | | | |
|--------------------------|--|---------------|----------------|-----------------|
| | <i>3 Tage</i> | <i>7 Tage</i> | <i>90 Tage</i> | <i>180 Tage</i> |
| <i>schnell erhärtend</i> | ~ 70 | ~ 85 | ~ 105 | ~ 105 |
| <i>normal erhärtend</i> | 50 bis 60 | 65 bis 80 | 105 bis 115 | 110 bis 125 |
| <i>langsam erhärtend</i> | 20 bis 40 | 50 bis 65 | 120 bis 140 | 125 bis 150 |

Bild 8 Druckfestigkeit in % der 28 Tage-Werte für Beton aus verschiedenen Zementen [6]

wenn der Zement bei der Eignungsprüfung — d. h. bei Festlegen der Betonzusammensetzung — eine sehr hohe Festigkeit aufweist und bei der späteren Bauausführung nur gut seine Normenforderungen erfüllt.

Für eine gleichbleibende Betonfestigkeit während der Bauausführung soll daher ein in seiner Güte gleichmäßiger Zement zur Verfügung stehen, d. h. ein Zement, der nicht nur die aus Gründen der Bausicherheit festgelegte Mindestfestigkeit nicht unterschreitet, sondern der aus den vorher dargelegten Gründen auch gewisse Höchstwerte nicht überschreitet. Durch die Festlegung einer unteren und einer oberen Grenze ergäbe sich für den Zement ein Druckfestigkeitsbereich, der die Schwankungsbreite einengt. Wenn diese Grenzen auch bei der Güteüberwachung des Zements nicht über- und unterschritten werden dürfen, müssen sie mindestens der 0,1 %-Fraktile entsprechen, d. h. den Werten, die — statistisch gesehen — nur von 0,1 % aller Prüfungen über- bzw. unterschritten werden. Bei einer Begrenzung der Standardabweichung der Zementdruckfestigkeit auf 30 kp/cm^2 , die damit recht klein und nur etwa halb so groß ist wie für die Standardabweichung der Betondruckfestigkeit auf guten Baustellen, ergibt sich dann nach den Gesetzen der Statistik je Zementgüteklasse ein Druckfestigkeitsbereich von $6 \times 30 = 180 \text{ kp/cm}^2$ im Alter von 28 Tagen. Dies bedeutet, daß die obere und die untere 5 %-Fraktile — d. h. die Grenze des Bereiches für 90 % aller Werte — etwa $\pm 50 \text{ kp/cm}^2$ vom statistischen Mittel entfernt sind.

Bei der Beurteilung von Endprodukten, wie z. B. Beton oder Stahl, möchte man heute aus Gründen der Bausicherheit von Mindestfestigkeiten, wie z. B. der 5 %-Fraktile, ausgehen (vgl. Abschnitt 2.3.2). Nach den Gesetzen der Statistik ist dies für Zwischenprodukte — d. h. einen Stoff, wie z. B. Zement, der zusammen mit anderen Stoffen zur Herstellung eines Endproduktes mit neuen Eigenschaften verwendet wird — nicht nötig und nicht zweckmäßig, da sich sonst eine viel zu große und unwirtschaftliche Sicherheit beim Endprodukt Beton ergibt. Die für die Betonzusammensetzung in Rechnung zu stellende Zementfestigkeit kann etwa der 35 %-Fraktile entsprechen und dann gleichzeitig eine Art Richtwert für die Zementherstellung sein.

2.3 Betongüte

2.3.1 Allgemeines

Die Betondruckfestigkeit im Alter von 28 Tagen ist die bestimmende Größe für die Betongüte. In DIN 1045 unterscheidet man die Betongüten B 120, B 160, B 225 und B 300. Für den Stahlbetonbau haben die Güten B 120 und B 160 heute eine nur noch geringe Bedeutung. Bei der hohen Festigkeit der heutigen Zemente und den für den Rostschutz einzuhaltenden Mindestzementgehalten erreicht üblich zusammengesetzter und fachgerecht hergestellter Beton durchweg eine wesentlich höhere Druckfestigkeit. Denn bei Beton der Güte B 120 würde sich ja ein W/Z-Wert von über 1,0 und ein Wassergehalt von über 300 l/m^3 ergeben, Bedingungen, die im allgemeinen wohl nur bei Unkenntnis der technologischen Zusammenhänge gewählt werden. Auch der Rost-

schutz der Bewehrung ist bei Beton der Güten B 120 und B 160 in vielen Fällen nicht genügend gesichert. Aus diesen Gründen ist der B 225 im Laufe der Zeit ganz von selbst die übliche „untere“ Betongüte für Stahlbetonarbeiten geworden.

Für die Sicherung der Betongüten über B 300, die in DIN 1045 noch nicht enthalten sind, aber bereits seit langem angewendet werden und in den Vorschriften für Massivbrücken (DIN 1075), für Stahlbetonfertigteile (DIN 4225), für Spannbeton (DIN 4227) und für Betonstraßen verankert sind, sind erhöhte Bedingungen für die Zusammensetzung und Herstellung des Betons erforderlich.

2.3.2 Statistische Überlegungen

Die DIN 1045, deren technologische Hinweise im wesentlichen aus den vierziger Jahren stammen, versteht unter der Betongüte die mittlere 28 Tage-Druckfestigkeit von drei 20 cm-Würfeln, die 7 Tage feucht und 21 Tage an Raumluft bei 15 bis 22 °C lagerten. Einzelwerte dürfen die Nennfestigkeit um 15 % unterschreiten. Durch die Erkenntnisse der Statistik gibt man sich bei der Beurteilung der Eigenschaften von Endprodukten, zu denen Beton ja gehört, mit einem Bezug der Güte auf Mittelwerte nicht mehr zufrieden. Da der Bruch von der schwächsten Stelle im Bereich hoher Beanspruchungen ausgeht, wird aus Gründen der Bausicherheit gefordert, daß die Bemessung des Betons auf eine Druckfestigkeit abgestimmt wird, die an möglichst vielen Stellen des Bauwerks erreicht oder überschritten wird. Diesen Ansprüchen wird man gerecht, wenn man die Betongüte nicht auf die Mittelwerte von drei Würfeln, sondern auf die Mindestfestigkeit, wie z. B. die 5 %-Fraktile aller Ergebnisse, abstimmt. Was dies bedeutet, soll mit Hilfe eines Beispiels in Bild 9 erläutert werden.

Bild 9 soll die für Beton der Güte B 300 erhaltenen Überwachungsergebnisse einer Großbaustelle enthalten, auf der die Betondruckfestigkeit während der Bauausführung laufend an Würfeln geprüft wurde, die alle aus verschiedenen Mischerfüllungen entnommen wurden. Die Ergebnisse wurden summarisch aufgetragen, und zwar auf der Ordinate die Häufigkeit der bei der Prüfung angefallenen Druckfestigkeiten und auf der Abszisse die Druckfestigkeiten selbst. Bei sehr vielen Ergebnissen ist eine Gauß'sche Kurve zu erwarten, die die Häufigkeitsverteilung der Druckfestigkeitsergebnisse zeigt. Der Mittelwert aller Ergebnisse, das statistische Mittel, liegt im Scheitelpunkt dieser Kurve und beträgt im vorliegenden Fall 360 kp/cm². Wenn die Standardabweichung der Einzelwerte (die mittlere quadratische Abweichung der Einzelwerte vom Mittelwert) 60 kp/cm² beträgt – ein für gute Baustellen üblicher Wert –, so liegt die 5 %-Fraktile, die Mindestfestigkeit, die nur von 5 % aller Werte unterschritten wird, bei 260 kp/cm².

Die Streuung der Mittelwerte von drei Würfeln ist geringer als die Streuung der Einzelwerte, weil durch die Mittelung bereits ein Teil der Streuungen herausgefallen ist. Sie beträgt 35 kp/cm² für das Beispiel in Bild 9. Mit Hilfe dieser Standardabweichung kann die Mindestfestigkeit – d. h. die 5 %-Fraktile – für die Mittelwerte von drei Einzelwerten errechnet werden. Sie beträgt im

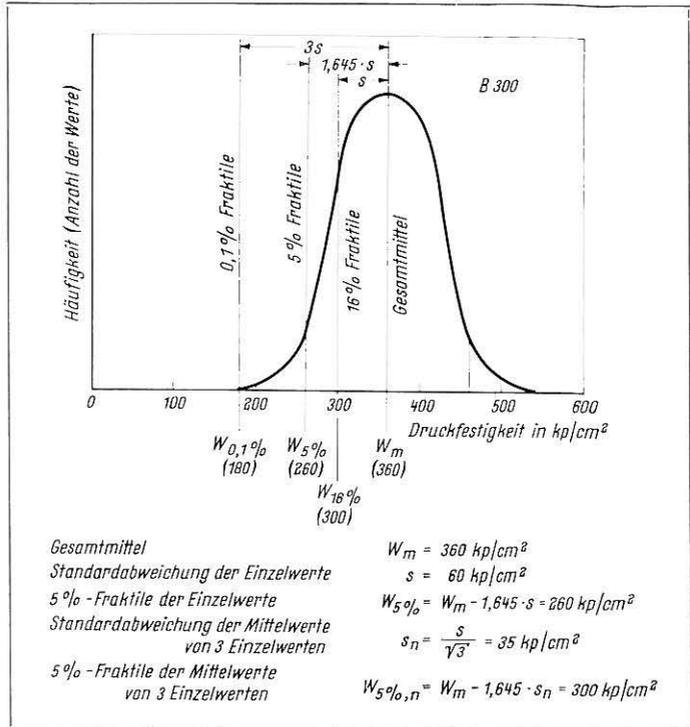


Bild 9 Statistische Überlegungen zur Festlegung der Betongüte

vorliegenden Fall 300 kp/cm^2 , ist allgemein i. M. 50 kp/cm^2 größer als die 5%-Fraktile der Einzelwerte und entspricht der Betongüte, die für das Beispiel B 300 war. (Die Übereinstimmung mit der derzeitigen Bezeichnung der Betongüte stimmt nicht ganz, weil zur Zeit die Unterschreitung durch die Einzelwerte auf 15 % begrenzt ist und in der Regel drei Würfel aus einer Mischerfüllung entnommen werden.)

Folgt man den Überlegungen der Statistiker, die als Bemessungsgrundlage und als Bezugsgröße für die Betongüte nicht den Mittelwert von drei Einzelwerten, sondern die 5%-Fraktile aller Ergebnisse fordern, so würde der Beton des Beispiels in Bild 9 nicht als Güte B 300, sondern als Güte B 250 zu bezeichnen sein. Für die Praxis bedeutet eine solche Regelung, daß überall dort, wo die 5%-Fraktile der Ergebnisse nicht oder erst später nachgewiesen werden kann, kein Einzelwert die Nennfestigkeit und kein Mittelwert von drei Einzelwerten den um etwa 50 kp/cm^2 höher liegenden Wert unterschreiten darf. Ähnliche Überlegungen lassen sich auch für alle anderen Betongüten anstellen. Bei diesem Vorgehen werden größere Streuungen der Betondruckfestigkeitsergebnisse – d. h. ungleichmäßiger Beton – nicht mehr, wie bisher, die Sicherheit verringern, sondern das Vorhaltemaß vergrößern, das der Betonhersteller gegenüber der Bemessungs-

grundlage (Nennfestigkeit, Betongüte) einhalten muß, um die gestellten Forderungen zu erreichen. Da die Vergrößerung des Vorhaltemaßes — d. h. das Herstellen des Betons mit größeren Reserven — auch Geld kostet, wird damit wenigstens für größere Baustellen und für stationäre Betriebe ein Anreiz für die Herstellung eines möglichst gleichmäßigen Betons gegeben.

2.4 Gewährleistung der geforderten Betonfestigkeit

Nach der Behandlung der Betongüte und der Einflußgrößen für die Betondruckfestigkeit stellt sich von selbst die Frage, wie eine geforderte Betonfestigkeit auf der Baustelle gewährleistet werden kann. Wie Bild 10 zeigt, enthält DIN 1045 bestimmte Forderungen für die Zugabe und Kornzusammensetzung der Zuschlagstoffe und für den Mindestzementgehalt, der allerdings für den Rostschutz der Bewehrung festgelegt worden ist. Eignungsprüfungen werden für die Betongüten B 225 und B 300, Güteprüfungen für die Betongüten B 160 und höher gefordert.

| Betongüte | Zuschlagstoffgemisch | | Mindestzementgehalt in kg/m^3 bei Hochbauten ^{x)} | |
|-----------|--|---------------------------------|---|-----|
| | Zugabe | Sieblinienbereich mindestens | ohne Einwirkung von Feuchtigkeit | mit |
| B 120 | ungetrennt | brauchbar | 300 | 300 |
| B 160 | 2 Korngruppen 0/7 mm und über 7 mm | brauchbar | 270 | 300 |
| | | besonders gut | 240 | 270 |
| B 225 | 2 Korngruppen 0/7 mm und über 7 mm | höchstens 60 Gew.-% 0/7 mm | 270 | 300 |
| | | besonders gut | 240 | 270 |
| B 300 | 3 Korngruppen 0/3 mm, 3/7 mm und über 7 mm | besonders gut | 300 | 300 |

^{x)} für Brücken mindestens 300 kg/m^3

Bild 10 Bedingungen der DIN 1045 (Fassung März 1966) für die Zusammensetzung des Betons

Nach dem Stand der Erkenntnisse bieten sich für die Gewährleistung der Betonfestigkeit praktisch zwei Wege an, vgl. Bild 11. Auf einfachen Baustellen kann eine bestimmte Betonfestigkeit am sichersten durch Regelmischungen (Rezeptbeton) erreicht werden. Darunter versteht man, daß der Betonhersteller mit vorgeschriebenen Mindestzementgehalten arbeitet, die für die einzelnen Betongüten in Abhängigkeit von Zementgüte, Zuschlagkornzusammensetzung und Betonkonsistenz festgelegt werden. Diese Mindestzementgehalte müssen so groß sein, daß die geforderte Festigkeit unter den auf einfachen Baustellen gegebenen Verhältnissen sicher erreicht wird und daß dabei auch der Korrosionsschutz der Bewehrung gesichert ist. Da die Zementgehalte

Auf einfach eingerichteten Baustellen

- a) Mindestzementgehalt abhängig von Zementgüte,
Zuschlagkornzusammensetzung und Betonkonsistenz
- b) Beschränkte Überwachung
(Nur für Betongüten bis etwa B 300)

Auf gut eingerichteten Baustellen

- a) Betonzusammensetzung (W/Z - Wert) nach Eignungsprüfung
- b) Umfangreiche Überwachung
- c) Erhöhte Anforderungen an Baustelle und Unternehmer

Bild 11 Möglichkeiten für eine gesicherte Herstellung von Beton bestimmter Güte

daher auf der sicheren Seite liegen müssen, kann es vorkommen, daß die verlangte Festigkeit bei diesem Herstellverfahren erheblich überschritten wird. Für solchen Beton genügen aber eine einfache Baustelleneinrichtung, etwas weniger geschultes Personal und eine nicht so umfangreiche Überwachung. Dieses Verfahren ist jedoch meist nur sinnvoll für Betongüten bis etwa B 300.

Baustellen, deren Einrichtung und Personal hohen Ansprüchen genügen, sind in der Lage, die betontechnologischen Erkenntnisse voll zu nutzen. Darunter versteht man, daß sie die für die jeweiligen Verhältnisse geeignetste Betonzusammensetzung nach einer Eignungsprüfung selbst festlegen. Die größere Freiheit in der Wahl der Mittel und die weitergehende Ausnutzung der Betonzusammensetzung erfordern allerdings eine eingehende Überwachung der Betoneigenschaften und eine Baustelleneinrichtung und -besetzung, die eine gleichmäßige Betonherstellung garantieren.

Dieses zweite Verfahren empfiehlt sich auch in allen stationären Betrieben – d. h. in Werken für Transportbeton und für Stahlbetonfertigteile –, da dort laufend große Mengen einer beschränkten Anzahl von Betonsorten mit den gleichen Ausgangsstoffen unter guter Kontrollmöglichkeit hergestellt werden. Dort lohnt sich eine aufwendigere Einrichtung, mit der der gewünschte Beton sicher und gleichmäßig hergestellt werden kann.

Ein so hergestellter Transportbeton kann auf allen gut eingerichteten und gut geleiteten Baustellen uneingeschränkt verwendet werden. Da aber für Beton höherer Güte auch besonders sorgfältige und sachkundige Verarbeitung, Verdichtung und Nachbehandlung sehr wichtig sind, erscheint der mit weniger Reserven hergestellte Transportbeton auf einfach eingerichteten Baustellen nur bis zur Betongüte B 300 verwendbar.

Nicht unbedeutend ist für die Gewährleistung einer bestimmten Festigkeit auch die Konsistenz des Betons. Sie ist ein Maß für seine Verarbeitbarkeit und so zu wählen, daß der Beton mit der

vorgesehenen Verdichtungsart ohne Entmischen vollständig verdichtet werden kann. In DIN 1045 wird steifer, weicher und flüssiger Beton unterschieden. Flüssiger Beton sollte im allgemeinen nicht verwendet werden, da er sich leicht entmischt und seine Verwendung daher mit Gefahren für die Sicherheit des Bauwerkes verbunden ist und da bei den heutigen Verdichtungsmöglichkeiten für seine Verwendung in der Regel auch kein Bedürfnis mehr besteht. Für den eigentlichen Rüttelbeton aber wird ein Konsistenzbereich benötigt, der zwischen den Konsistenzbereichen steif und weich liegt und für den es ja auch bereits Kennwerte gibt (Konsistenzbereich K₂) [9].

3. Verformungen

Entsprechend den in Abschnitt 1 herausgestellten Beeinflussungsmöglichkeiten der Betoneigenschaften soll hier nur darauf hingewiesen werden, daß bei den Verformungen unter sonst gleichen Verhältnissen der Einfluß der Eigenschaften des Zementsteins zugunsten des Einflusses der Eigenschaften der Zuschlagstoffe zurückgeht. Dies gilt für üblichen Beton, d. h. für Beton mit dünnen Zementsteinschichten und mit Zuschlagstoffen, die wesentlich fester als der Zementstein sind und deren Elastizitätsmodul wesentlich größer als der des Zementsteins ist. Es wird u. a. dadurch bestätigt, daß z. B. Basaltbeton bei gleicher Druckfestigkeit einen wesentlich größeren Elastizitätsmodul als Kiessandbeton besitzt und daß Schwindunterschiede des Zements oder des Zementsteins bei üblichem Beton durch die ausgleichende Wirkung des Zuschlags fast nicht mehr hervortreten. Bei Beton mit weniger festen, verformbareren Zuschlagstoffen oder mit dickeren Zementsteinschichten können sich die Eigenschaften des Zementsteins wieder stärker auf die Verformungen auswirken.

4. Dichtigkeit

4.1 Allgemeines und Versuchserfahrungen

Die Dichtigkeit des Betons ist bestimmend für fast alle besonderen Eigenschaften des Betons, wie z. B. Rostschutz der Bewehrung, Wasserundurchlässigkeit, Beständigkeit, chemische Widerstandsfähigkeit und hohen Frostwiderstand. Für alle Eigenschaften, die die Dichtigkeit des Betons voraussetzen, sind bei vollständiger Verdichtung und üblichen Zuschlagstoffen die Eigenschaften des Zementsteins von entscheidender Bedeutung. Dichter Beton setzt dichten Zementstein voraus, über dessen Struktur und Eigenschaften vor allem die Versuche von T. C. Powers und Mitarbeitern Auskunft geben.

Bild 12, bei dem auf der Ordinate die Wasserdurchlässigkeit und auf der Abszisse der W/Z-Wert und die Kapillarporenmenge aufgetragen worden sind, zeigt, daß der Zementstein nach ausreichender Erhärtung etwa bis zum W/Z-Wert von 0,60 praktisch wasserundurchlässig ist, daß danach aber die Wasserdurchlässigkeit mit wachsendem W/Z-Wert rasch zunimmt. Die ausgeprägte Zunahme der Wasserdurchlässigkeit ist darauf zurückzuführen, daß die durch nicht gebundenes Anmachwasser verbleibenden Kapillarporen des Zementsteins bei größeren W/Z-Werten als etwa

0,60 auch nach längerer Nachbehandlung miteinander verbunden sind. Bild 13 zeigt, daß die Porosität und die Wasserdurchlässigkeit des Zementsteins bei Wasserlagerung mit wachsendem Alter sehr stark abnehmen [10, 11].

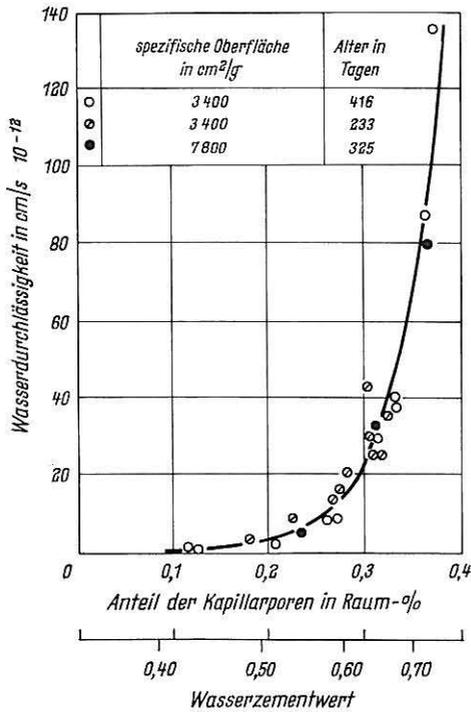


Bild 12
Wasserdurchlässigkeit des Zementsteins in Abhängigkeit von Kapillar-Porosität und W/Z-Wert [10]

| Alter Tage | Porosität Vol.-% | Durchlässigkeitskoeffizient 10 ⁻¹² cm/sec |
|---------------|------------------|--|
| frische Paste | 67 | 1 150 000 000 |
| 1 | 63 *) | 36 300 000 *) |
| 2 | 60 *) | 2 050 000 *) |
| 3 | 57 *) | 191 000 *) |
| 4 | 55 *) | 23 000 |
| 5 | 53 | 5 900 |
| 7 | 52 | 1 380 |
| 12 | 51 | 195 |
| 24 | 48 | 46 |

*) Interpolierter Wert

Bild 13 Porosität und Wasserdurchlässigkeit von Zementstein in Abhängigkeit von Alter und Nachbehandlung [10]

Auch mit Beton wurden zahlreiche Versuche [12, 13] durchgeführt, bei denen die Dichtigkeit bevorzugt mit der Wasserdurchlässigkeit beurteilt wurde. In Bild 14 ist die Wasserdurchlässigkeit von 7 Tage altem Beton aus verschiedenen Zementen in Abhängigkeit vom W/Z-Wert aufgetragen, auf der Ordinate die größte Wassereindringtiefe bei der Prüfung nach DIN 1048 als Maß für die Wasserdurchlässigkeit des Betons. Die Wasserdurchlässigkeit nimmt mit abnehmendem W/Z-Wert deutlich ab. Der große Streubereich im Bereich großer W/Z-Werte ergibt sich durch die sehr unterschiedlichen Zemente, die bis zum Alter von 7 Tagen auch einen sehr unterschiedlichen Hydratationsgrad erreichen. Naturgemäß liegen Betone mit schnell erhärtenden Zementen an der unteren Grenze und Betone mit langsam erhärtenden Zementen an der oberen Grenze des großen Streubereiches. Bild 15 zeigt den Zusammenhang zwischen Wasserdurchlässigkeit (größte Wassereindringtiefe nach DIN 1048) von Beton aus verschiedenen Zementen und dem Alter. Die Wasserdurchlässigkeit des Betons nimmt bei Verhinderung des Austrocknens mit dem Alter sehr stark ab. Die größte Wassereindringtiefe liegt im Alter von 28 Tagen bei allen Betonen mit $W/Z \leq 0,60$ unter 3 cm und überschreitet in diesen Fällen auch nach statistischer Beurteilung 5 cm nicht.

Die Durchlässigkeit des Zementsteins und des Betons gegenüber Druckwasser ist nicht der alleinige Beurteilungsmaßstab für die Dichtigkeit und die Dichtigkeit voraussetzenden besonderen Eigenschaften des Betons. Einzubeziehen sind bei der Beurteilung auch die weiteren Erkenntnisse, z. B. über Wasseraufsaugen

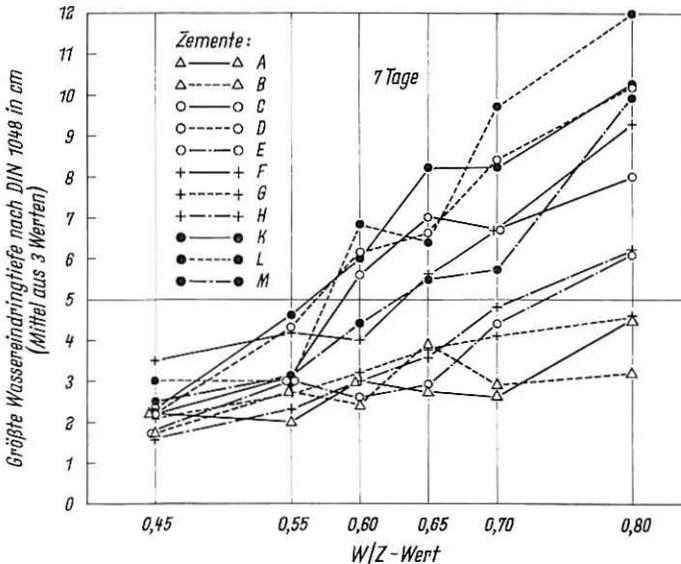


Bild 14 Größte Wassereindringtiefe nach DIN 1048 im Betonalter von 7 Tagen in Abhängigkeit vom W/Z-Wert [13]

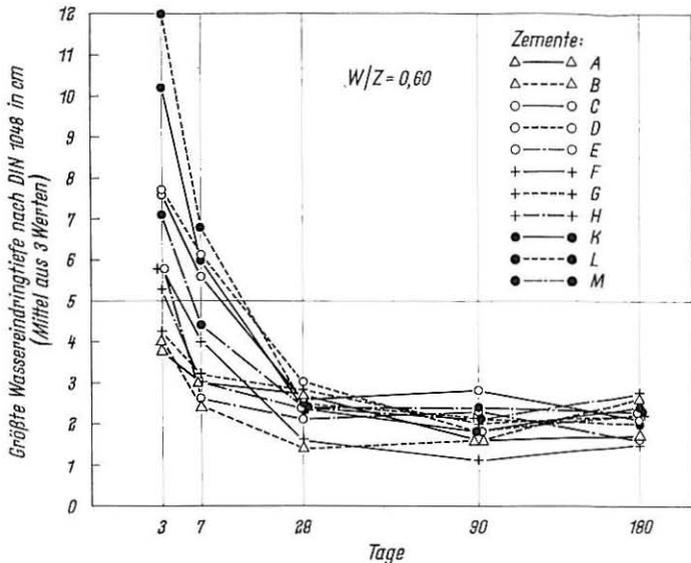


Bild 15 Größte Wassereindringtiefe nach DIN 1048 bei $W/Z = 0,60$ in Abhängigkeit vom Betonalter [13]

(Wasseraufnahme), Diffusionsvorgänge, Gas- und Luftdurchlässigkeit und über das Verhalten des Betons unter den entsprechenden Beanspruchungen in Labor und Praxis.

4.2 Bedingungen für Beton mit besonderen Eigenschaften

Aus Versuchen und Erfahrungen lassen sich die Bedingungen für die mit der Dichtigkeit zusammenhängenden Eigenschaften des Betons ableiten. Die wesentlichen Bedingungen sind in Bild 16 zusammengestellt. Darüber hinaus sind die allgemeingültigen Erfahrungen für die Zusammensetzung und Herstellung des Betons zu beachten. Der Beton ist möglichst vollständig zu verdichten, am besten durch Rütteln, und wenigstens 7 Tage vor Austrocknen zu schützen.

Für den Rostschutz der Bewehrung ist neben ausreichender Betondeckung und der Vermeidung korrosionsfördernder Zusätze je nach Zement der W/Z -Wert auf 0,65 bis 0,75 zu begrenzen und ein Zementgehalt von mindestens 240 bis 280 kg/m^3 erforderlich. — Vollständig verdichteter und ausreichend nachbehandelter Beton ist praktisch wasserundurchlässig, wenn seine größte Wassereindringtiefe bei der Prüfung nach DIN 1048 (Mittel aus drei Werten) 5 cm nicht überschreitet. Dies wird erreicht, wenn bei auch sonst sachgemäßer Betonzusammensetzung der W/Z -Wert 0,60 nicht überschreitet, d. h. daß unter Berücksichtigung unvermeidlicher Streuungen auf der Baustelle ein W/Z -Wert von 0,55 angestrebt werden muß. Für Rüttelbeton, der sich bei Zuschlag-

| | |
|---|---|
| Wasserundurchlässigkeit | $e_{max} \leq 5 \text{ cm}$ $W/Z \leq 0,60$ |
| Hoher Widerstand gegen chemische Angriffe | bei schwachem Angriff : $e_{max} \leq 5 \text{ cm}$ $W/Z \leq 0,60$ |
| | bei starkem Angriff : $e_{max} \leq 3 \text{ cm}$ $W/Z \leq 0,50$ |
| | bei sehr starkem Angriff : Schutz des Betons |
| | ab 400 mg SO_4 je l : Zemente mit erhöhtem Sulfatwiderstand |
| Hoher Frostwiderstand | $W/Z \leq 0,60$ oder $W/Z \leq 0,70 + LP$ -Zusatz |
| | Bei Tausalzeinwirkungen stets LP-Zusatz |

Bild 16 Bedingungen für Beton mit besonderen Eigenschaften

gemischen mit 30 mm Größtkorn im besonders guten Bereich nach DIN 1045 mit einem Wassergehalt zwischen 150 und 180 l/m³ einwandfrei herstellen läßt, ist dann ein Zementgehalt zwischen 280 und 330 kg/m³ erforderlich. Dieser wasserundurchlässige Beton besitzt auch einen erhöhten Frostwiderstand (vgl. Bild 16).

Für die Beurteilung von chemischen Einwirkungen auf Beton ist es zweckmäßig, in DIN 4030 in Zukunft Bereiche mit schwachem, starkem und sehr starkem Angriffsvermögen zu unterscheiden [14, 15, 16]. Diese Bereiche wurden so festgelegt, daß schwachen Angriffen ein wasserundurchlässiger Beton ($W/Z \leq 0,60$; größte Wassereindringtiefe nach DIN 1048 $\leq 5 \text{ cm}$) und starken Angriffen ein noch dichter Beton ausreichend widersteht, dessen größte Wassereindringtiefe nach DIN 1048 3 cm und dessen W/Z-Wert 0,50 nicht überschreitet. Wegen der unvermeidlichen Streuungen ist dann bei Beton mit hohem Widerstand gegen starke chemische Angriffe auf der Baustelle ein W/Z-Wert von etwa 0,45 anzustreben. Bei einem Zuschlaggemisch im besonders guten Bereich nach DIN 1045 mit 30 mm Größtkorn und Verdichten durch Rütteln erfordert dieser Beton einen Wassergehalt zwischen 150 und 180 l/m³ und einen Zementgehalt zwischen 340 und 400 kg/m³.

Sehr starken chemischen Angriffen [14, 15, 16] kann Beton längere Zeit nicht ausgesetzt werden, so daß in solchen Fällen immer ein dauerhafter Schutz des Betons notwendig ist.

4.3 Zusätzliche Maßnahmen bei Beton mit besonderen Eigenschaften

Einige besondere Eigenschaften erfordern außer der Dichtigkeit des Betons Zusatzmaßnahmen, so z. B. die chemische Widerstandsfähigkeit des Betons auch stoffliche Maßnahmen. Im allgemeinen sind nur Zuschlagstoffe zu verwenden, die gegenüber den angreifenden Stoffen beständig sind. Carbonathaltige Zuschläge können verwendet werden, wenn sich die angreifenden

Stoffe nicht oder nur sehr wenig erneuern und ein Neutralisieren des angreifenden Mediums erreicht werden kann [14, 16].

Wässer mit mehr als 400 mg SO₄ je Liter und Böden mit mehr als 3000 mg SO₄ je kg erfordern außer einem dichten Beton nach Abschnitt 4.2 auch die Verwendung eines Zements mit hohem Sulfatwiderstand. Dies sind:

- a) Portlandzement mit höchstens 3 Gew.-% Tricalciumaluminat,
- b) Hochofenzement mit mindestens 70 Gew.-% Hüttensand,
- c) Hochofenzement, dessen Klinkeranteil höchstens 3 Gew.-% Tricalciumaluminat und dessen Hüttensand höchstens 13 Gew.-% Al₂O₃ enthält,
- d) Sulfathüttenzement.

Bei Beton für Meerwasserbauten ist dies nicht notwendig, wenn ein Beton mit hohem Widerstand gegen starke chemische Angriffe hergestellt wird, vgl. Abschnitt 4.2 [14, 16].

Nach umfangreichen in- und ausländischen Erfahrungen [17, 18] erfordert Beton, der Frost-Tausalz-Einwirkungen ausreichend widerstehen soll, unbedingt einen auf die Betonzusammensetzung abgestimmten Gehalt an feinen Luftporen. Die Luftporen können als Ausweichraum für die Volumenvergrößerung beim plötzlichen Gefrieren des Wassers nur wirksam sein, wenn ihr Abstand untereinander gering ist und sie im Beton fein aufgeteilt sind. Aus diesem Grunde soll der Abstandsfaktor – ein aus den Meßergebnissen unter bestimmten geometrischen Annahmen errechneter Wert der größten Entfernung aller Punkte des Zementsteins vom Rand der am nächsten liegenden Luftpore – 0,2 mm nicht überschreiten. Dies wird erreicht, wenn eine sehr große Zahl der im Beton vorhandenen Luftporen keinen größeren Durchmesser als etwa 0,3 mm aufweist. Der Gehalt an kleinen Luftporen kann am Frischbeton nicht nachgeprüft werden. Durch zahlreiche Versuche ist jedoch bekannt, daß im erhärteten Beton ein ausreichender Gehalt an Mikroporen vorhanden ist, wenn bei Verwendung erprobter LP-Mittel der Gesamtluftgehalt des verdichteten Frisch-

| Kennwerte der Betonzusammensetzung | | Mörtel bzw. Beton mit einem Zuschlaggrößtkorn von | | | | | | | | | | |
|---|----------------------|---|---------|-----|---------|-----|---------|-----|---------|-----|---------|-----|
| | | 0,2mm | 7mm | | 15mm | | 30mm | | 50mm | | 70mm | |
| Mehlkorngehalt kg/m ³ (Zement + Feinstoffe) bis 0,2mm) | | - | 550 | 500 | 475 | 425 | 400 | 350 | 350 | 300 | 325 | 275 |
| Wassergehalt l/m ³ | | - | bis 210 | | bis 190 | | bis 170 | | bis 155 | | bis 145 | |
| Feinmörtelmenge (Mehlkorn + Wasser) Stoffraum-% | | - | 39 | 38 | 35 | 33 | 30 | 29 | 27 | 26 | 25 | 24 |
| Gesamtluft- gehalt des Betons in % | Einzelwerte mind. | 10,4 | 4,0 | 4,0 | 3,5 | 3,5 | 3,0 | 3,0 | 3,0 | 3,0 | 2,5 | 2,5 |
| | Mittelwerte mind. | 12,1 | 5,0 | 4,5 | 4,5 | 4,0 | 3,5 | 3,5 | 3,0 | 3,0 | 3,0 | 3,0 |

Bild 17 Gesamtluftgehalt für Beton mit hohem Frostwiderstand

betons die Werte des Bildes 17 nicht unterschreitet. Da der Frost-Tausalz-Widerstand des Betons bei beständigen Zuschlagstoffen von der Menge und Beschaffenheit des Feinmörtels (Zement + Wasser + Feinststoffe bis 0,2 mm) abhängt, ist der Mehlkorngehalt (Zement + Feinststoffe bis 0,2 mm) auch nach oben zu begrenzen und der Gesamtluftgehalt auf die Feinmörtelmenge abzustimmen. In der Regel genügt es aber, den erforderlichen Gesamtluftgehalt in Abhängigkeit vom Zuschlaggrößtkorn festzulegen, weil bei üblichem Beton im allgemeinen eine feste Beziehung zwischen Feinmörtelmenge und Zuschlaggrößtkorn vorausgesetzt werden kann. Bild 17 nennt Mindestwerte für den Gesamtluftgehalt des Frischbetons in Abhängigkeit von Mehlkorngehalt, Feinmörtelmenge und Zuschlaggrößtkorn.

5. Zusammenfassung

In einem Überblick werden zement- und betontechnische Zusammenhänge herausgestellt, die bei einer Neubearbeitung von Zement- und Betonvorschriften Beachtung verdienen. Die Festigkeit und die besonderen Betoneigenschaften, die Dichtigkeit voraussetzen, werden bei vollständiger Verdichtung und ausreichender Nachbehandlung im wesentlichen von den Eigenschaften des Zementsteins bestimmt. Die dafür wichtigste Einflußgröße ist der W/Z-Wert, für den Richtwerte sowohl für bestimmte Festigkeiten als auch für den Rostschutz, die Wasserundurchlässigkeit, den Frostwiderstand und die chemische Widerstandsfähigkeit genannt werden können.

Für die Gewährleistung der Betoneigenschaften auf der Baustelle bieten sich zwei Möglichkeiten an. Während eine bestimmte Festigkeit auf einfachen Baustellen am sichersten durch Regelmischungen (Rezeptbeton) gewährleistet wird, kann auf Baustellen, deren Einrichtung und Personal hohen Ansprüchen genügen und auf denen die Betonherstellung eingehend überwacht wird, die für die jeweiligen Verhältnisse geeignetste Betonzusammensetzung nach einer Eignungsprüfung festgelegt werden. Dieses zweite Verfahren empfiehlt sich auch in Werken für Transportbeton und für Stahlbetonfertigteile.

Die mehr und mehr geforderte Gleichmäßigkeit des Betons setzt nicht nur Einrichtungen für gleichbleibende Mischungszusammensetzungen voraus, sondern auch gleichmäßige Ausgangsstoffe. Auch aus Gründen der Bausicherheit kann es daher zweckmäßig sein, für die 28 Tage-Druckfestigkeit der Zemente der unteren Güteklassen nicht nur einen Mindestwert, sondern auch eine obere Begrenzung einzuführen.

Da der Bruch stets von der schwächsten Stelle im Bereich hoher Beanspruchungen ausgeht, wird angestrebt, die Betongüte auf eine Mindestfestigkeit abzustimmen, die an möglichst vielen Stellen des Bauwerks erreicht oder überschritten wird, z. B. auf die 5 %-Fraktile der Ergebnisse. Bei diesem Vorgehen werden größere Streuungen der Festigkeit – d. h. ungleichmäßiger Beton – nicht wie bisher die Bausicherheit verringern, sondern das erforderliche Vorhaltemaß vergrößern.

SCHRIFTTUM

- [1] Walz, K.: Über die Herstellung von Beton höchster Festigkeit. beton 16 (1966) H. 8, S. 339/340; ebenso Belontechnische Berichte 1966, Beton-Verlag, Düsseldorf 1967, S. 139/144.
- [2] Wischers, G.: Aufnahme von Druckkräften in Scherbeton und in Leichtbeton. beton 17 (1967) H. 5, S. 183/186; ebenso Belontechnische Berichte 1967, Beton-Verlag, Düsseldorf 1968, S. 53/62.
- [3] Alexander, K. M., J. Wardlaw und D. J. Gilbert: Aggregate-cement bond, cement paste strength and the strength of concrete. Bericht auf der Internationalen Konferenz "On the Structure of Concrete", London 1965.
- [4] Hummel, A.: Das Beton-ABC. 12. Auflage, Verlag von Wilh. Ernst & Sohn, Berlin 1959, S. 88 und 165.
- [5] Anleitung für die Zusammensetzung und Herstellung von Beton mit bestimmten Eigenschaften mit Erläuterungen von K. Walz. 2. Auflage, Verlag von Wilh. Ernst & Sohn, Berlin 1963.
- [6] Bonzel, J., und J. Dahms: Der Einfluß des Zements, des Wasserzementwertes und der Lagerung auf die Festigkeitsentwicklung des Betons. beton 16 (1966) H. 7, S. 299/305, und H. 8, S. 341/342; ebenso Belontechnische Berichte 1966, Beton-Verlag, Düsseldorf 1967, S. 115/138.
- [7] Walz, K., und J. Bonzel: Festigkeitsentwicklung verschiedener Zemente bei niedrigerer Temperatur. beton 11 (1961) H. 1, S. 35/48; ebenso Belontechnische Berichte 1961, Beton-Verlag, Düsseldorf 1962, S. 9/46.
- [8] Richartz, W., und F. W. Locher: Ein Beitrag zur Morphologie und Wasserbindung von Calciumsilicathydraten und zum Gefüge des Zementsteins. Zement-Kalk-Gips 18 (1965) H. 9, S. 449/459.
- [9] Walz, K.: Grundlagen der Betontechnologie. FT 1229, 5. Auflage, Beton-Verlag, Düsseldorf 1964, S. 28/29.
- [10] Powers, T. C.: Structure and physical properties of hardened portland cement paste. Portland Cement Association, Bulletin 94, Chicago 1958.
- [11] Wischers, G.: Physikalische Eigenschaften des Zementsteins. beton 11 (1961) H. 7, S. 481/486; ebenso Belontechnische Berichte 1961, Beton-Verlag, Düsseldorf 1962, S. 199/213.
- [12] Walz, K.: Undurchlässiger Beton. Bautechnik-Archiv, H. 13. Verlag von Wilh. Ernst & Sohn, Berlin 1956.
- [13] Bonzel, J.: Der Einfluß des Zements, des W/Z-Wertes, des Alters und der Lagerung auf die Wasserundurchlässigkeit des Betons. beton 16 (1966) H. 9, S. 379/383, und H. 10, S. 417/421; ebenso Belontechnische Berichte 1966, Beton-Verlag, Düsseldorf 1967, S. 145/168.
- [14] Bonzel, J.: Beurteilungsgrundsätze und technologische Maßnahmen für Beton in angreifenden Wässern. Betonstein-Zeitung 29 (1963) H. 11, S. 633/636.
- [15] Locher, F. W., und H. Pisters: Beurteilung betonangreifender Wässer. Zement-Kalk-Gips 17 (1964) H. 4, S. 129/136.
- [16] Locher, F. W.: Chemischer Angriff auf Beton. beton 17 (1967) H. 1, S. 17/19, und H. 2, S. 47/50; ebenso Belontechnische Berichte 1967, Beton-Verlag, Düsseldorf 1968, S. 19/34.
- [17] Walz, K., und R. Springenschmid: Betonstraßen und Tausalzeinwirkung. beton 12 (1962) H. 11, S. 507/512; ebenso Belontechnische Berichte 1962, Beton-Verlag, Düsseldorf 1963, S. 159/175.
- [18] Bonzel, J.: Beton mit hohem Frost- und Tausalz widerstand. beton 15 (1965) H. 11, S. 469/474, und H. 12, S. 509/515; ebenso Belontechnische Berichte 1965, Beton-Verlag, Düsseldorf 1966, S. 185/216.