

Über die Herstellung von Beton höchster Festigkeit *)

Von Kurt Walz, Düsseldorf

Übersicht

Beton, der bei niederen Temperaturen und unter Druck erhärtet, liefert bei sonst gleicher Zusammensetzung höhere Festigkeiten. Im Laboratorium wurden zwei Betonmischungen aus Quarzit 0/15 mm und Basalt 0/15 mm mit 350 kg/m^3 PZ 475 und einem Wasserzementwert von 0,32 bei 5°C gemischt und nach Verdichten mit einem Rüttelstampfer einem Druck von 20 kp/cm^2 während der ersten 24 Stunden ausgesetzt. Nach 6 Wochen lag die Druckfestigkeit des Quarzitbetons bei 1230 kp/cm^2 , die des Basaltbetons bei 1430 kp/cm^2 . Auf diese Weise lassen sich somit sehr hochfeste Betone erzielen; einer Anwendung in der Praxis stehen jedoch die mit diesem Verfahren verbundenen Aufwendungen entgegen.

1. Allgemeines

Die Herstellung von Beton mit einer Druckfestigkeit von 600 bis 800 kp/cm^2 nach 28 Tagen ist heute in gut eingerichteten und geleiteten Betonfertigteil-Werken mit ausreichender Sicherheit und ohne ungewöhnliche Maßnahmen möglich.

Beton mit wesentlich höherer Druckfestigkeit kann man im Laboratorium erzielen. Im Betonwerk oder auf der Baustelle ist dies zur Zeit nicht möglich, da dazu nach dem heutigen Stand der Kenntnisse neben einer besonderen Zusammensetzung des Betons auch ungewöhnliche Arbeitsverfahren nötig sind, die für Bauwerksbeton kaum und für Fertigteile nur mit einem besonderen Aufwand und dann auch beschränkt angewandt werden könnten.

2. Zement

Tonerdeschmelzzement liefert von allen hydraulischen Zementen wohl die höchste Betonfestigkeit. Er ist jedoch für hochbeanspruchte Konstruktionen nach den insbesondere in den letzten Jahren in Deutschland gemachten Erfahrungen nicht zuverlässig anzuwenden, weil seine Festigkeit im Laufe der Jahre infolge Umwandlung bestimmter Hydratationsprodukte in nicht vorher abschätzbarem Maße abfallen kann.

*) Beitrag für den V. Kongreß der Internationalen Vereinigung für Spannbeton (FIP; Paris, Juni 1966).

Zur Herstellung von Beton höchster Festigkeit kommen daher nach den amtlichen deutschen Bestimmungen nur Portlandzemente sehr hoher Festigkeit von rd. 600 kp/cm² und höher in Frage (Normendruckfestigkeiten im Alter von 28 Tagen nach DIN 1164).

3. Autoklavbehandlung

Durch Härtung des Betons in hochgespanntem Dampf kann man unter günstigen Verhältnissen sehr hohe Betonfestigkeiten erzielen. Bei diesem Herstellverfahren wird das bei der Hydratation des Zements freigesetzte Calciumhydroxid, das die Alkalität des Betons maßgebend bestimmt, durch die Reaktion mit dem Quarzsand des Zuschlags weitgehend gebunden. Der Korrosionsschutz der Bewehrung, besonders der für Spannstähle, erscheint daher auf die Dauer weniger gesichert als im normal erhärteten Beton, wenn nicht besondere Maßnahmen getroffen werden.

4. Zuschlaggestein

Der Zuschlag muß neben hoher Festigkeit und Zähigkeit eine gedrungene Kornform und eine mäßig rauhe, sandpapierartige, etwas kantige Oberfläche aufweisen. Eine solche Kornform und Oberfläche sind betontechnisch und für die Haftung des Zementsteins an der Zuschlagoberfläche am günstigsten. Der Haftung zwischen Zementstein und Zuschlagkorn kommt bei Beton höchster Druckfestigkeit eine ausschlaggebende Bedeutung zu. Die mechanische Haftung des Zementsteins kann man wesentlich unterstützen, wenn als Zuschlag solches Gestein benutzt wird, das sehr fest, zäh und dicht ist und außerdem wegen seiner stofflichen Affinität mit den Bestandteilen des Zements in Wechselwirkung tritt (wie z. B. bestimmte reine Kalksteine, Hochofenschlacken, beständige, nach Korngruppen klassierte Portlandzementklinker). Zur Verbesserung der Haftung ist auch eine chemische Oberflächenbehandlung des Zuschlags denkbar. Die Anwendung spezieller Zuschlagstoffe wird aber wegen der Schwierigkeit der Gewährleistung der erforderlichen Eigenschaften und zum Teil auch wegen der Kosten beschränkt bleiben. Dasselbe würde auch für Zuschläge gelten, deren Oberfläche zur Verbesserung der Haftung chemisch besonders vorbehandelt wird.

5. Mischen und Verdichten des Betons

Der Wassermenge eines Betons für höchste Festigkeit muß sehr klein (unter 0,40) eingestellt werden. Die Mischung wird daher immer sehr steif (etwa erdfeucht) sein. Sie erfordert deshalb ein besonders sorgfältiges Mischen und kräftiges Verdichten. Vermutlich sind Zwangsmischer, die zusätzlich mit einem kneten- den Werkzeug (Kollerwalze) ausgerüstet sind, wirkungsvoller als übliche Zwangsmischer. Die vollständige Verdichtung kann nur unter Auflast erreicht werden [1], so daß Innenrüttler für die Verdichtung ausscheiden.

6. Besondere Einwirkungen

Verdichteter, frischer Beton, der in der Form oder Schalung unter einem zusätzlichen Druck erhärtet, erreicht eine höhere Festigkeit als der sonst gleich gut verdichtete Beton ohne Druckbelastung. Es wird ein dichteres Gefüge und eine verbesserte Zuschlaghaftung durch Eliminieren des während der Hydratation auftretenden Schrumpfens des Zementleims erhalten; entsprechend wirkt auch ein Nachverdichten zum geeigneten Zeitpunkt.

Für die Herstellung von Beton höchster Festigkeit ist auch zu berücksichtigen, daß die spätere Festigkeitsentwicklung von Portlandzementen mit raschem Reaktionsablauf günstiger ist, wenn diese anfänglich bei niedrigerer Temperatur erhärten; auch die günstige Wirkung des oben erwähnten Erhärtens unter Druck wird dadurch gefördert.

7. Beton höchster Festigkeit im Laboratorium

Bei der nachfolgenden Studie soll gezeigt werden, wie unter Verwendung eines handelsüblichen Portlandzements der obersten Güteklasse (Z 475) und von üblichen, sehr festen Zuschlagstoffen (Quarzit oder Basalt) Beton mit einer Druckfestigkeit von über 1200 kp/cm² im Laboratorium hergestellt werden kann, wenn dabei einige besondere, allerdings aufwendige und nur beschränkt anwendbare technologische Verfahren entsprechend den obigen Überlegungen benutzt werden.

Die wesentlichsten Angaben über die Zusammensetzung je eines Betons mit gebrochenem Quarzit 0/15 mm und Basalt 0/15 mm finden sich in Tafel 1. Das Zuschlaggemisch wies in beiden Fällen folgende Anteile auf

bis	0,2	1	3	7	15 mm
	0	9	21	45	100 %

Die Normendruckfestigkeit des verwendeten Portlandzements fand sich bei der Prüfung nach DIN 1164 im Alter von 28 Tagen zu 594 kp/cm². Die Schnitte in den Bildern 1 und 2 geben das Gefüge der aus den beiden Mischungen gefertigten Würfel 10 cm · 10 cm · 10 cm wieder.

Mit dem *Quarzitbeton* entstanden nach 42 Tagen eine Rohdichte von 2,49 kg/dm³ und eine Druckfestigkeit von 1229 kp/cm², mit dem *Basaltbeton* eine Rohdichte von 2,81 kg/dm³ und eine Druckfestigkeit von 1430 kp/cm².

Die Ergebnisse der jeweils geprüften drei 10 cm-Würfel wiesen nur geringe Unterschiede auf.

Die *Spaltzugfestigkeit* fand sich, wieder im Mittel aus 3 Würfeln, für den Quarzitbeton zu 61 kp/cm² und für den Basaltbeton zu 91 kp/cm² (Spaltfläche rechtwinklig zur Stampffläche der Würfel). Man erkennt, daß das Verhältnis von Spaltzugfestigkeit zu Druckfestigkeit 1:20 bzw. 1:16 beträgt und daß es für den Beton höchster Güte ungünstiger liegt als beim Beton geringerer Druckfestigkeit, eine Tendenz, die bekannt ist [2].

Tafel 1 Zusammensetzung und Behandlung von Beton für eine Druckfestigkeit von über 1200 kp/cm²

Zusammensetzung:

Portlandzement Z 475 ($N_{28} = 594 \text{ kp/cm}^2$ nach DIN 1164)

Zementgehalt rd. 350 kg/m³

Wasserzementwert 0,32

Zuschlag:

Quarzsand 0/1 mm und gebrochener Quarzit 2/15 mm
oder

Basaltbrechsand und -splitt bis 15 mm

Mischen im Zwangsmischer während 5 min bei + 5 °C

Verdichtung und Behandlung:

Würfel mit 10 cm Kantenlänge

Verdichtung mit Rüttelstampfer in 4 Schichten je 30 sec,
nach 30 min während 30 sec nachverdichtet

Erhärtung unter Druck von 20 kp/cm² während der ersten
24 h

Lagerung: 1. Tag bei + 5 °C,

6 Tage bei rd. + 10 °C,

35 Tage bei + 20 °C;

(davon 28 Tage unter Wasser und 14 Tage an der Luft)

Prüfung im Alter von 42 Tagen:

Druck gleichlaufend zur Stampfrichtung

	Quarzitbeton	Basaltbeton
Rohdichte	2,49 kg/dm ³	2,81 kg/dm ³
Druckfestigkeit	1229 kp/cm ²	1430 kp/cm ²
Spaltzugfestigkeit	61 kp/cm ²	91 kp/cm ²

8. Bemerkungen zur Anwendung von Beton höchster Festigkeit

Die vorliegende Studie zeigt, daß es im Laboratorium mit besonderen Maßnahmen möglich ist, Beton mit einer Druckfestigkeit von rd. 1200 oder gar 1400 kp/cm² herzustellen ¹⁾. Die Ausgangsstoffe der Mischungen waren nicht ungewöhnlich, doch war das technische Vorgehen so aufwendig, daß eine Übertragung auf die Praxis kaum möglich sein dürfte.

Abgesehen davon würde Beton mit einer Druckfestigkeit von 1000 kp/cm² und mehr in den meisten Fällen seiner Anwendung

¹⁾ Für reinen Zementstein, der mit einem Wasserzementwert von 0,32 und einem Portlandzement mit einer Normendruckfestigkeit $N_{28} = 536 \text{ kp/cm}^2$ entstand, wurde bei anderen Versuchen eine Druckfestigkeit von rd. 1000 kp/cm² nach 42tägiger Wasserlagerung erhalten; siehe [3].

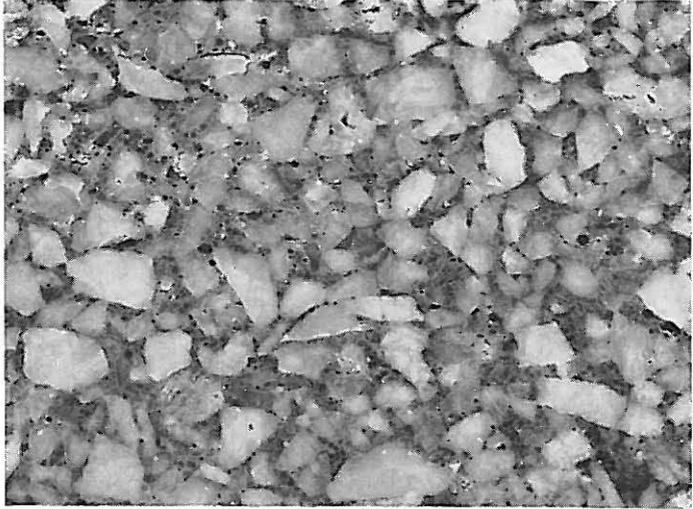


Bild 1 Schnitt durch Beton mit Quarzitzuschlag 0/15 mm; Druckfestigkeit im Alter von 6 Wochen 1229 kp/cm² (Maßstab etwa 1:1)

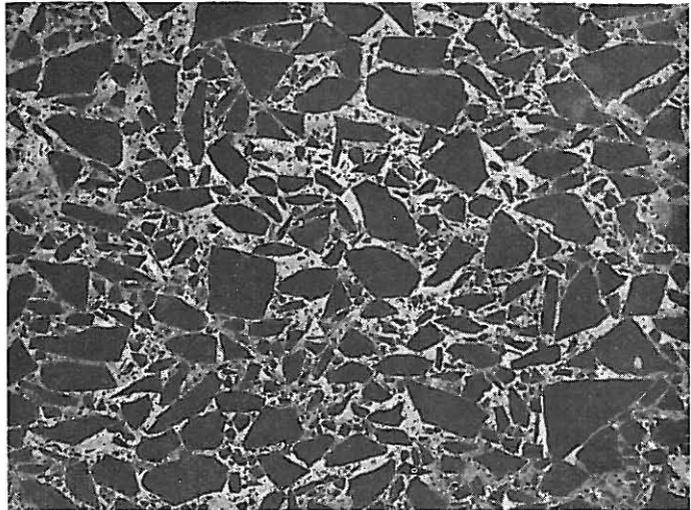


Bild 2 Schnitt durch Beton mit Basaltzuschlag 0/15 mm; Druckfestigkeit im Alter von 6 Wochen 1430 kp/cm² (Maßstab etwa 1:1)

nur geringe Vorteile gegenüber dem einfacher beherrschbaren derzeitigen „hochwertigen“ Beton mit Druckfestigkeiten um 600 kp/cm² bieten. Er könnte nur wirtschaftlich genutzt werden, wenn kleinere Querschnitte der Konstruktion möglich wären, wenn u. a. auch der Bewehrungsanteil des Spannstahls oder dessen Festigkeit und zulässige Spannungen noch weiter erhöht

würden und wenn die Eintragung der größeren Spannkkräfte an den Bauteilenden zuverlässig zu meistern wäre. Solcher Beton erlaubt auch keine wesentlich höhere Zugbeanspruchung. Zentrisch belastete Säulen könnten u. U. einen kleineren Querschnitt erhalten, dem sind jedoch wegen der Knickgefahr Grenzen gesetzt; auch zusätzliche Maßnahmen für den erforderlichen Feuerwiderstand würden nötig werden.

SCHRIFTTUM :

- [1] Walz, K.: Rüttelbeton. 3. Auflage, Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin 1960, S. 13.
- [2] Bonzel, J.: Über die Spaltzugfestigkeit des Betons. beton 14 (1964) H. 3, S. 108/114, und H. 4, S. 150/157; ebenso Betontechnische Berichte 1964, Beton-Verlag, Düsseldorf 1965, S. 59/96.
- [3] Wischers, G.: Einfluß einer Temperaturänderung auf die Festigkeit von Zementstein und Zementmörtel mit Zuschlagstoffen verschiedener Wärmedehnung. Schriftenreihe der Zementindustrie, H. 28, Düsseldorf 1961, Bild 7.