

Zur Klassifikation von hochfestem Beton

Autor(en): **Meyer, Bruno**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Cementbulletin**

Band (Jahr): **58-59 (1990-1991)**

Heft 21

PDF erstellt am: **10.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-153760>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

CEMENTBULLETIN

SEPTEMBER 1991

JAHRGANG 59

NUMMER 21

Zur Klassifikation von hochfestem Beton

Festigkeit als Leitgrösse. Ein Vorschlag zur Klassifikation. Zugehörige Prüfmethode und Umrechnungsbeispiel. Auf Bekanntem aufbauen.

Konstruktionsbeton hat üblicherweise Festigkeiten von 30–50 N/mm². Mischungen mit höheren Werten liegen jenseits der alltäglichen Vorstellungen, weil sie nur in Spezialfällen praktisch angewendet werden. Die nachstehenden Ausführungen seien eine Orientierungshilfe, um Angaben über ausgeführte Bauten oder Laborversuche einordnen zu können. Sie zeigen, dass auch der Bereich des hochfesten Betons strukturiert ist.

Festigkeit als Leitgrösse

Damit ein Bauwerk die gestellten Anforderungen erfüllen kann, muss es unter den vorgesehenen Beanspruchungen jeweils bestimmte, vertraglich vereinbarte Eigenschaften aufweisen. Wohl wichtigste Grösse seiner tragenden Teile ist ihre Festigkeit. Der Baustoff Beton hat nun die Eigenart, dass mit steigender Festigkeit auch andere (aber nicht alle!) Eigenschaften verbessert werden. Als Folge dieser Gleichläufigkeit wurde die Festigkeit in der Vergangenheit oft als einzige Kenngrösse verwendet. Obwohl sie nur einen Teil der Materialqualität erfasst, glaubte man, den Anforderungen insgesamt zu genügen (Festigkeitsdenken). Weil sich solche Einseitigkeit verhängnisvoll auswirken kann, müssen die Baustoffeigenschaften sowohl

2 im einzelnen wie auch in ihrer Gesamtheit den jeweiligen Anforderungen genügen.

Beton wird in den Normen klassifiziert, indem man eine Kombination von Rohdichte und Druckfestigkeit angibt. Mit der Rohdichte unterscheidet man Leicht-, Normal- und Schwerbeton. Weil Leicht- und Schwerbeton weniger häufig vorkommen, hat die Klassifikation nach Rohdichte eine untergeordnete Bedeutung. Zudem wird Normalbeton abgekürzt als Beton bezeichnet. Betonklassen sind also meist Festigkeitsklassen. Sie decken die Betonqualität nicht hinreichend ab. Bei anspruchsvolleren Problemen genügt es z.B. nicht, bloss eine höhere Betonklasse auszuschreiben oder anzubieten (vgl. CB 19/1989). Wenn man die Betonqualität steigern will, wird man bei der *Leistungsfähigkeit* ansetzen, wie in einem späteren Cementbulletin erläutert wird.

Unter hochfestem Beton versteht man einen Beton mit einer mittleren Würfeldruckfestigkeit, die bei 28 Tagen grösser ist als 60 N/mm^2 [1]. Er ist in den Normen nicht eigens erwähnt. Die Normen beschränken sich auf üblichen Beton und legen die Festigkeitsklassen wie folgt fest:

- Norm SIA 162: B 25/15 bis B 45/35 und folgende, abgestuft in 5 N/mm^2 und nach oben nicht begrenzt,
 - DIN 1045: B 5 bis B 55, abgestuft in 5 bzw. 10 N/mm^2 ,
 - ENV 206: C 12/15 bis C 50/60, mit verschiedensten Abstufungen,
- wobei zudem die Einflüsse unterschiedlicher Prüfbedingungen zu beachten sind. Wenn es nun für den Bereich über 60 N/mm^2 keine Betonklassen mehr gibt, könnte der Eindruck entstehen, eine Abstufung sei beliebig, überflüssig oder gar unbekannt. Die Betontechnologie zeigt aber, dass auch für hochfesten Beton noch Teilbereiche zu unterschieden sind. Während es möglich ist, unter den rauen Bedingungen von Baustellen ohne ausgefallene Materialien oder Geräte bis zu 90 N/mm^2 zu gelangen, scheint der Bereich über 150 N/mm^2 für Konstruktionsbeton noch nicht erschlossen zu sein. Es ist deshalb sinnvoll, diese weite Spannweite mit Hilfe einer Klassifikation abzustufen und dann die einzelnen Teilbereiche getrennt auf ihre Leistungsfähigkeit zu untersuchen.

Mit hochfestem Beton gelangt man gleichzeitig in den Bereich hoher Leistungsfähigkeit. Wenn nun trotzdem nur gemäss Festigkeit klassifiziert wird, sei dies keine Rückkehr zum Festigkeitsdenken. Es setzt allerdings voraus, dass man die Festigkeit nicht als alleinigen Kennwert, sondern als *Leitgrösse* unter allen anderen Festbetoneigenschaften betrachtet. Sie sei also eine Skala zur Abgrenzung eines Felds, zu der die anderen Skalen wie z.B. Verarbeitbarkeit, Porosität usw. je nach Bedarf ergänzt und in Beziehung gesetzt werden.

3 Ein Vorschlag zur Klassifikation

Grundlage für jede Betonherstellung ist ein Mischungsentwurf mit dem Ziel, ein brauchbares Betonrezept festzulegen. Zu diesem Zweck werden die technologischen Grössen üblicherweise in erster Annäherung zum W/Z-Wert vereinfacht. Es zeigt sich dann, dass die Festigkeit mit abnehmendem W/Z-Wert zunimmt (Gesetz von *Abrams* [2]). Den W/Z-Wert kann man nun senken, indem man den Wassergehalt reduziert und/oder die Zementdosierung erhöht. Man wird allerdings an Grenzen stossen, die durch die Hydratation und die Verarbeitbarkeit bestimmt sind. Bei üblichem Beton liegen sie im Bereich von 0,40–0,50.

Um nun hochfesten Beton herzustellen, wird man einen W/Z-Wert anvisieren, der im Bereich von 0,40–0,20 liegt. Dies ist nur mittels Zusatzmitteln möglich. Wie die zugehörige Technologie zeigt, haben neben dem W/Z-Wert noch weitere Grössen einen Einfluss: Verwendung von Silikastaub, Eigenschaften des Zuschlags, Verträglichkeit von Zusätzen und Zement, Mischtechnik usw. Daraus ergibt sich eine qualitative Abstufung, die zur Unterteilung des oberen Festigkeitsbereichs benützt werden kann. *P.-C. Aïtcin* schlägt vor, sie als Grundlage für eine Klassifikation des hochfesten Betons zu verwenden, vgl. Tab. 1. Die einzelnen Klassen erstrecken sich über einen Festigkeitsbereich von je 25 N/mm² und sind zudem charakterisiert durch den W/Z-Wert, die Zementdosierung, den Zuschlag (Grösstkorndurchmesser, Festigkeit) und die Zusätze.

In CB Nr. 5/84 [1] wurde das «Chicago Mercantile Exchange Center» vorgestellt. Dessen Stützen und Versteifungswände sind demnach der Klasse I und die beiden erwähnten Testsäulen der Klasse II von Tab. 1 zuzuordnen. Die bisher höchsten bautechnisch genutzten Werte stammen aus Seattle, USA ($f_{cm} = 131 \text{ N/mm}^2$, $W/Z = 0,22$, also Klasse III). Damit sind auch die technologischen Grenzen der Festigkeitssteigerung skizziert.

Prüfmethoden und Beispiel zur Umrechnung

Weil der Vorschlag aus Nordamerika stammt, ist ein Hinweis auf die Prüfbedingungen notwendig. In der Schweiz wird die Festigkeit an Würfeln von 200 mm Kantenlänge im Alter von 28 Tagen ermittelt. Die europäische Vornorm für Beton (ENV 206) schreibt Zylinder von 150 mm Durchmesser und 300 mm Höhe oder Würfel von 150 mm Kantenlänge vor. Für hochfesten Beton ist dieses Vorgehen aus verschiedenen Gründen nur bedingt geeignet. Man wird sich deshalb zuerst über die Methode einigen müssen. In Nordamerika besteht für *hochfesten Beton* die Tendenz, als charakteristischen Wert die

Tabelle 1 Klassifikation von hochfestem Beton. Vorschlag P.-C. Aitcin (1989), [3]

Klasse	Druckfestigkeit ¹⁾ f_{cm} [N/mm ²]	Mischungsentwurf			Bemerkungen
		W/Z-Wert Bindemittel (kg/m ³)	Zusatzmittel	Zusatzstoffe	
I	75 (62–88)	0,30–0,40 400–580	Fliessmittel (HBV)	nicht notwendig, nur wenn preislich von Vorteil	Diese Klasse kann überall erreicht werden, wo es gelingt, mit einem W/Z-Wert zwischen 0,3 und 0,4 zu arbeiten. Spezialzement ist nicht notwendig. Üblicher Zuschlag. Luftpo- renbeton nur in Spezialfällen möglich.
II	100 (88–112)	0,25–0,30 450–580	Fliessmittel (HBV) mit oder ohne Verzögerer (VZ) zur Kontrolle der Konsistenz (total etwa 6–16 l/m ³). Übliche Luftpo- renmittel ungeeignet.	Silicastaub, Hochofenschlacke	Kontrolle der Verträglichkeit von Bindemittel und Zusätzen. Gebrochener Zuschlag mit kubi- schen Körnern. Grösstkorn: 12 mm. Frost- beständigkeit auch ohne Zusatzmittel mög- lich. Einfluss des Transports beachten.
III	125 (112–138)	0,20–0,25 > 500	sehr hohe Dosierung an HBV und VZ	Silicastaub (weniger als 10%)	Alle Komponenten müssen eine ausseror- dentliche Qualität aufweisen. Wirksame Mischtechnik und hohe Qualitätskontrolle. Anforderungen an die Festigkeit nach 1–2 Tagen beachten.
IV	> 150	< 0,20 > 500	etwa 25% Zusätze (bezogen auf den Zement)		Eher ein Feinstbeton. Bisher nur im Labor hergestellt (Dänemark, Aalborg Ciment 1981: 280 N/mm ² , W/Z = 0,16, künstlicher Zuschlag mit Grösstkorn 4 mm).

¹⁾ Die Druckfestigkeit wird hier an Zylindern ($\varnothing = 100$ mm, $h = 200$ mm) nach 91 Tagen ermittelt. Je Klasse ist der Bereich der Mittelwerte angegeben. Beispiel: Ein Beton mit $f_{cm} = 105$ N/mm² gehört zur Klasse II.

Der W/Z-Wert wird gerechnet als Flüssigkeit (Wasser + Wasser der Zusatzmittel) je Bindemittel.

Zusätze = Zusatzmittel + Zusatzstoffe

5 Beispiel für die Berechnung des Rechenwerts f_c

Gegeben: Hochfester Beton. Mittlere Druckfestigkeit $f_{cm} = 80$ MPa nach 91 Tagen. Standardabweichung $S = 3,5$ MPa. Variationskoeffizient: 4,4% (gut). Probekörper: Zylinder \varnothing 100 mm, Höhe 200 mm, separat hergestellt.

Gesucht: Rechenwert f_c für die statische Berechnung

Gemäss Norm SIA 162 beträgt der Rechenwert $f_c = 0,65 \times f_{c, \min (cube)}$. $f_{c, \min (cube)}$ ist der Mindestwert der Festigkeit an Würfeln (200 × 200 mm) und berechnet sich aus dem Mittelwert wie folgt:

$$f_{c, \min} = f_{cm} - 2S.$$

Da hochfester Beton an Zylindern geprüft wird, sind die Werte wie

folgt umzurechnen:

– Einfluss des Durchmessers der Zylinder:

$$f_{c (cyl 100)} = 1,06 f_{c (cyl 150)}$$

– Einfluss der Form (Zylinder statt Würfel):

$$f_{c (cube 200)} = 1,18 f_{c (cyl 150)}$$

Also:

$$f_{c (cube 200)} = 1,18 : 1,06 f_{c (cyl 100)} = 1,11 f_{c (cyl 100)}$$

Zahlenbeispiel:

$$f_{c, \min (cyl 100)} = 80 - 2 \times 3,5 = 73 \text{ MPa}$$

$$f_{c, \min (cube 200)} = 1,11 \times 73 = 81 \text{ MPa}$$

$$f_c = 0,65 \times 81 = 53 \text{ MPa (nach 91 Tagen)}$$

(Masseinheiten: 1 MPa = 1 N/mm²; 1000 Psi = 6,9 N/mm²)

Druckfestigkeit an Zylindern von 100 mm Durchmesser und 200 mm Höhe im Alter von 91 Tagen zu ermitteln. Das höhere Alter wird mit den Argumenten begründet, dass die Zusätze zur Festigkeitsentwicklung beitragen, aber langsamer reagieren als Zement und dass die volle Belastung solcher Konstruktionen ohnehin nicht vor 91 Tagen auftritt. Bei früherem Prüftermin würde man also einen merklichen Teil der erreichbaren Werte verschenken. Das bedeutet aber nicht, dass die anfängliche Festigkeitsentwicklung nicht auch zu berücksichtigen wäre (z. B. für Ausschulfristen, Bauzustände usw.). Die Zylinderform wird gewählt, weil die Probekörper einfacher zu präparieren sind. Der kleinere Durchmesser (100 statt 150 mm) bezweckt, dass man mit kleineren Prüfeinrichtungen auskommen kann. Die Maschinen benötigen auch bei hochfestem Beton eine Kapazität der 1,5fachen Bruchlast und eine genügende Steifigkeit, so dass jede Reduktion der Zylinderabmessungen erwünscht ist. Wie verschiedene Vergleichsmessungen zeigten, erhält man mit kleineren Zylindern höhere Werte. Das Verhältnis wurde nachgewie-

6 sen zu $f_{c, \text{cyl } \varnothing 100} = 1,06 \times f_{c, \text{cyl } \varnothing 150}$ [4]. Dieser Beiwert schwankt zwischen 1,00–1,16, und zwar unabhängig davon, ob im hohen oder niedrigen Festigkeitsbereich gemessen wird. Er soll für den Einzelfall durch Vorversuche ermittelt werden [vgl. z. B. in 5].

Für rechnerische Vergleichszwecke kann die Würfeldruckfestigkeit aus der Zylinderdruckfestigkeit wie folgt abgeleitet werden: $f_{c, \text{cube } 200} = 1,18 f_{c, \text{cyl } 150}$ (DIN 1045, 7.4.3). Seite 5 zeigt ein Umrechnungsbeispiel.

Entwicklung durch Aufbau auf Bekanntem

Hochfester Beton ist vorwiegend beim Bau von Hochhäusern gefragt, in zweiter Linie bei Türmen und Brücken. Für eine verbreitete Anwendung fehlen allgemeingültige Kenntnisse der baustatischen Grössen wie Zugfestigkeit, E-Modul, Kriechen, Schwinden und Sicherheit. Diesbezügliche Angaben der Normen können nicht ohne Vorbehalt auf höhere Festigkeitsbereiche extrapoliert werden. Auf der Seite der Betonherstellung wird, wie ausgeführte Beispiele zeigen, die in CB 15/79 [1] erwähnte Tendenz bestätigt. Für Realisierungen braucht es aber eine *mehrfährige Vorarbeit* mit Labor- und Feldversuchen. Sie wird erleichtert, indem man die Kenntnisse der täglichen Betonarbeit in ihren verschiedenen Aspekten verbessert und dann darauf aufbauen kann.

Bruno Meyer
dipl. Ing. ETH

Literatur

- [1] Bisherige Cementbulletins zum Thema «Hochfester Beton»: Nr. 7/1970; Nr. 15/1979, Nr. 5/1984
- [2] *Trüb, U.* (1978): «Der Wasserzementwert». Cementbulletin Nr. 7
- [3] *Aitcin, P.-C.* (1989): «Les bétons à très haute résistance». Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées, No 162, juillet-août, p. 55–60
- [4] *Lessard, M.; Aitcin, P.-C.* (1990): «Comment tester les B.H.P.». Dans: Malier, Y.: Les bétons à hautes performances. Paris: Presses ponts et chaussées
- [5] *Howard, N.L.; Leatham, D.M.* (1989): «The Production and Delivery of High-Strength Concrete». Concrete Journal, Vol. 11, Nr. 4, april, p. 26–30