

Ermittlung charakteristischer Kennwerte für Beton

Dr.-Ing. F. Spörel (BAW)

1 Allgemeines

In den Stufen A und B des BAW-Merkblatts „Beurteilung der Tragfähigkeit bestehender massiver Wasserbauwerke (TbW)“ kommen unterschiedliche Methoden zur Ableitung charakteristischer Betonkennwerte zur Anwendung. Während in der Stufe A auf Grundlage von zur Bauzeit gültigen Regelwerken in Anlehnung an die Brückennachrechnungsrichtlinie (BMVBS, 2011) Festigkeitskennwerte abgeleitet werden, erfolgt dies in der Stufe B auf Grundlage von Bauwerksuntersuchungen. Im Beitrag werden die Vorgehensweisen sowie Hintergründe zu den Festlegungen erläutert.

2 Materialkennwerte in der Untersuchungsstufe A

Zur Bewertung der Tragfähigkeit bestehender Bauwerke sind als Grundlage Kennwerte zu Betoneigenschaften erforderlich. Das Merkblatt TbW bietet über die Untersuchungsstufen A bis C drei Varianten mit unterschiedlichem Bearbeitungsaufwand. Die Sichtung von Bestandsunterlagen wie Baubeschreibungen und Baupläne, Fotos aus der Bauzeit sowie Unterlagen über in der Vergangenheit durchgeführte Instandsetzungsmaßnahmen sind in jeder Stufe erforderlich. Oft liefern bei alten Bauwerken aus dem Ende des 19. und Beginn des 20. Jahrhunderts auch ausführliche Artikel aus der Zeitschrift für das Bauwesen oder im Zentralblatt der Bauverwaltung hilfreiche Informationen zu Betonzusammensetzung, -herstellung, -eigenschaften und Betoneinbau. Die Unterlagen liefern Erkenntnisse zum Aufbau des Bauwerks sowie der verwendeten Baustoffe und ermöglichen so ergänzend zu den Inspektionsberichten einen gezielteren Blick auf das Bauwerk während der Objektbegehung.

Die Ermittlung von Betoneigenschaften erfolgt unter Berücksichtigung der Bestandsunterlagen in der Untersuchungsstufe A über Tabelle 1 und Tabelle 2. Die Kennwerte der charakteristischen Druckfestigkeit mit einem Baujahr nach 1932 wurden aus der Nachrechnungsrichtlinie (BMVBS, 2011) übernommen. Hintergründe zu den Tabellen der Nachrechnungsrichtlinie finden sich beispielsweise in (Schnell et. al, 2012). Die Kennwerte resultieren aus theoretischen Betrachtungen zu den damals eingesetzten Werkstoffen. Erkenntnisse aus Bauwerksuntersuchungen sind nicht eingeflossen.

Da die BAW seit über 40 Jahren Bohrkernuntersuchungen durchführt, liegen zahlreiche Daten zum Beton bestehender alter Wasserbauwerke vor. Bei der Datenauswertung stellte sich heraus, dass die anhand von Bohrkernprüfungen ermittelten charakteristischen Druckfestigkeiten häufig unterhalb der Anforderungen der damals geltenden Regelwerke lagen (Bild 1). Die blauen Linien im Diagramm stellen die Normforderungen für die jeweils niedrigste und höchste Güte-

/Festigkeitsklasse während der Geltungsdauer der Norm dar. Die Anforderungen wurden aus (BMVBS, 2011) entnommen. Weiterhin war die aus der Spaltzugfestigkeitsprüfung abgeleitete Zugfestigkeit des Betons häufig niedriger als die nach DIN EN 1992-1-1 aus der charakteristischen Druckfestigkeit abgeleitete Zugfestigkeit (Bild 2).

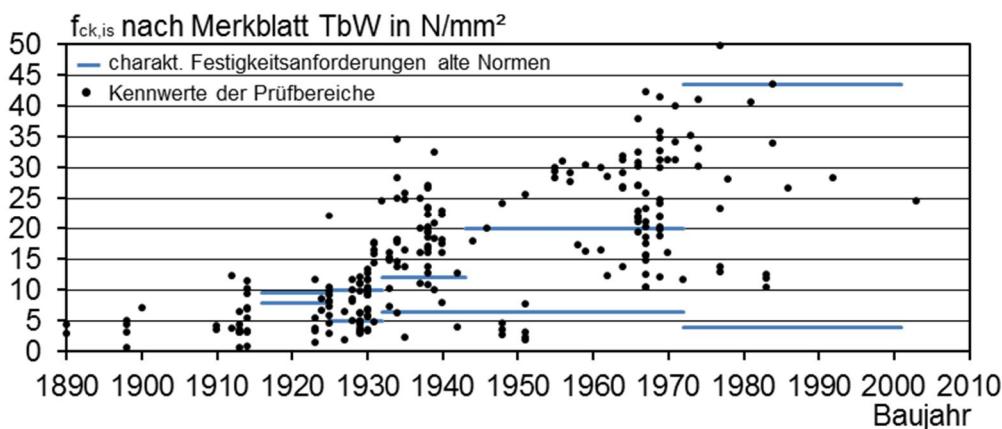


Bild 1: Charakteristische Druckfestigkeit am Bauwerk und zur Bauzeit gültige Anforderungen

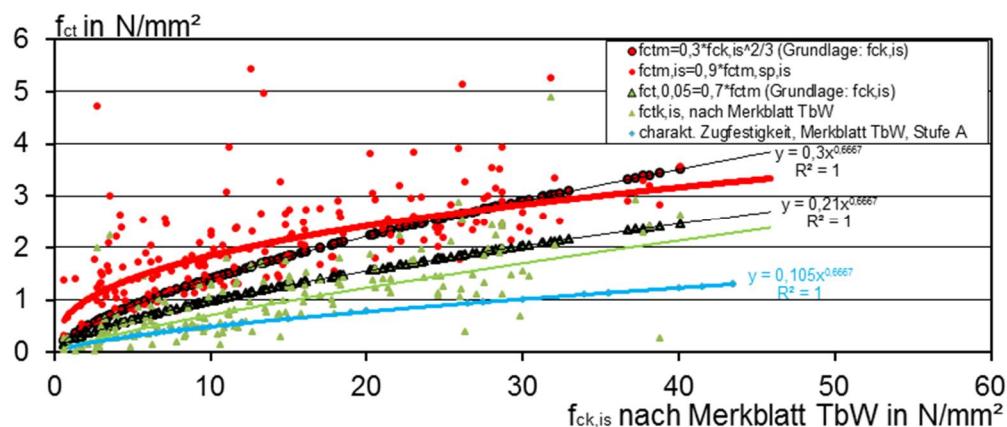


Bild 2: Zusammenhang zwischen Druck- und Zugfestigkeit am Bauwerksbeton

Die aus den Druckfestigkeitswerten nach DIN EN 1992-1-1:2011-01, Tabelle 3.1 abgeleiteten Zugfestigkeiten liegen damit zu einem großen Teil auf der unsicheren Seite. Daher wurde in Tabelle 1 ergänzend eine Spalte für die charakteristische Zugfestigkeit aufgenommen. Die Werte betragen etwa die Hälfte der Werte nach DIN EN 1992-1-1, die Herleitung dieser Werte kann Bild 2 entnommen werden. Auf die Zuordnung einer Festigkeitsklasse zu den alten Güteklassen wird aufgrund dieser Abweichungen in der Tabelle verzichtet.

Tabelle 1: Zuordnung der charakteristischen Druck- und Zugfestigkeit für verschiedene Betongüten und -festigkeitsklassen bis 1972 (bzw. 1980 nach TGL)

Zeitraum	Betongüte/-festigkeitsklasse	Charakt. Druckfestigkeit $f_{ck,Zyl}$ in N/mm ²	Charakt. Zugfestigkeit $f_{ctk;0,05}$ in N/mm ²
Vor 1932	-	4	0,2
1932 – 1943 DIN 1045:1932-05	$W_{b28} = 120 \text{ kg/cm}^2$	6,5	0,3
	$W_{b28} = 160 \text{ kg/cm}^2$	8,5	0,4
	$W_{b28} = 210 \text{ kg/cm}^2$	12,0	0,5
1943 – 1972 DIN 1045:1943-03 DIN 1045:1959-11 DIN 4227:1953-10 TGL bis 1980 TGL 0-1045:1963-04 TGL 0-1045:1973-04 TGL 0-4227:1963-05	B 120	6,5	0,3
	B 160	11,0	0,5
	B 225	15,0	0,6
	B 300	20,0	0,7
	B 450	30,0	1,0
	B 600	40,0	1,2

Tabelle 2: Zuordnung der charakteristischen Druck- und Zugfestigkeit für verschiedene Betonfestigkeitsklassen von 1972 bis 2001

Zeitraum	Betongüte/-festigkeitsklasse	Charakt. Druckfestigkeit $f_{ck,Zyl}$ in N/mm ²	Charakt. Zugfestigkeit $f_{ctk;0,05}$ in N/mm ²
1972 – 1978 DIN 1045:1972-01	Bn 50	4,0	0,2
	Bn 100	8,0	0,4
	Bn 150	12,0	0,5
	Bn 250	20,0	0,7
	Bn 350	27,5	0,9
	Bn 450	35,5	1,1
	Bn 550	43,5	1,3
1978 – 2001 DIN 1045:1978-23 DIN 1045:1988-07	B 5	4,0	0,2
	B 10	8,0	0,4
	B 15	12,0	0,5
	B 25	20,0	0,7
	B 35	27,5	0,9
	B 45	35,5	1,1
	B 55	43,5	1,3
TGL von 1980 - 1990 TGL 33411/01:1979-06	Bk 5	4,0	0,2
	Bk 7,5	5,5	0,3
	Bk 10	7,5	0,4
	Bk 15	11,5	0,5
	Bk 20	15,0	0,6
	Bk 25	19,0	0,7
	Bk 35	26,5	0,9
	Bk 45	34,0	1,1
	Bk 55	41,5	1,2

Ist in der Stufe A der E-Modul zu berücksichtigen, wird dieser entsprechend der bereits zurückgezogenen DIN 1045-1:2008-08 hergeleitet. Die Berechnung nach DIN EN 1992-1-1 würde die tatsächlich vorhandenen Werte meist überschätzen.

3 Materialkennwerte in der Untersuchungsstufe B

In der Stufe B erfolgt eine Bestimmung von Materialkennwerten anhand von Bohrkernuntersuchungen. Dazu wird auf der Basis der Bestandsunterlagen, der Inspektionsberichte, der visuellen Bauwerksbegutachtung und der Begutachtungsziele in Abstimmung mit dem Tragwerksplaner ein Konzept für die Durchführung der Bauwerks- und Laboruntersuchungen erstellt. Die Bohrkernentnahme, die Dokumentation und der Transport der Bohrkerne erfolgt nach BAW-Merkblatt Bohrkernentnahme für Bauwerksuntersuchungen (BAW, 2012). Das Bauwerk wird in Prüfbereiche eingeteilt, die Beton der gleichen Grundgesamtheit erwarten lassen. Grundsätzlich erfolgt eine Beprobung mittels Vertikalbohrkernen und Horizontalbohrkernen. Alte Wasserbauwerke wurden häufig mit einer äußeren Schale mit besserer Qualität als der Kernbeton hergestellt. Dies kann mit den Horizontalbohrungen erkundet werden. Vertikalbohrungen liefern neben den Prüfkörpern für die Materialuntersuchungen hilfreiche Erkenntnisse zum Aufbau und zur Struktur über die Bauwerkshöhe.

Ein zur Beurteilung des Bauteilaufbaus hilfreiche Untersuchungsmethode ist die Videoendoskopie der Bohrlöcher. Insbesondere wenn keine zusammenhängenden Bohrkerne gewonnen werden können, liefert diese Erkenntnisse zu möglichen Ursachen wie z. B. ein ungeeignetes Bohrverfahren oder eine tatsächlich schlechte Betonstruktur. Weiterhin liefert die Endoskopie Hinweise zu Durchströmungen im Bauwerk durch Risse oder Arbeitsfugen.

Die Bohrkerne werden vor der Prüfkörpergewinnung zusammenhängend ausgelegt und fotografisch dokumentiert. Dies ermöglicht eine Bewertung des Betongefüges. Da die charakteristische Festigkeit auf einen nassgelagerten Zylinder $h/d=2$ bezogen ist, wird im Merkblatt die Prüfung der Druckfestigkeit am Prüfkörper $h/d=2$ empfohlen. Die Festigkeit eines Prüfkörpers mit $h/d=1$ muss mit dem bekannten Faktor 0,82 abgemindert werden. Untersuchungen der BAW an Bohrkernen weisen allerdings darauf hin, dass auch deutlich niedrigere Faktoren vorliegen können. Die Datenbasis hierzu wird erweitert. Das BAW Merkblatt empfiehlt den Beton in einem dem Bauwerkszustand angemessenen Feuchtezustand zu prüfen. Häufig befinden sich die Bauteilbereiche in ständigem Wasserkontakt. Sollten Prüfkörper in trockenem Zustand geprüft werden empfiehlt das BAW-Merkblatt eine Abminderung der Zylinderfestigkeit um den Faktor 0,9. Dies spiegelt die allgemeine Erkenntnis zum Einfluss des Feuchtezustands auf die Druckfestigkeit wider.

Ein Aspekt, der über die Prüfergebnisse von Bohrkernproben nicht erfasst werden kann ist die Erkenntnis, dass gerade bei alten Wasserbauwerken häufig Bohrkerne vorliegen, welche sich zumindest teilweise in einem nicht prüfbaren Zustand befinden (Bild 3). Ursache ist entweder eine Zerstörung durch ein ungeeignetes Bohrverfahren oder dass ein nicht prüfbarer Beton vorhanden ist. Dies wird durch die Fotodokumentation nachvollziehbar und lässt beispielsweise Rückschlüsse auf bestimmte Bauteilabschnitte zu, in denen die Betonqualität vom übrigen Zustand abweicht. Die Ermittlung der charakteristischen Festigkeit kann sich nur auf den prüfbaren Bohrkernanteil be-

schränken. Dies ist bei der Bewertung der Ergebnisse bzw. den Hintergründen zu den Tabellenwerten zu bedenken.



Bild 3: Bohrkerne, die nicht zur Ermittlung von Festigkeitskennwerten geeignet sind

Bislang erfolgt eine Auswertung von Druckfestigkeitsprüfungen an Bohrkernen nach DIN EN 13791:2008-05. Verschiedene Quellen stellen die Eignung der DIN EN 13791 für die Bewertung alter Betonbauwerke jedoch in Frage (Loch et. al., 2011; Steenbergen, Vervuurt, 2012). Dies bestätigt auch die umfangreiche Datenbasis der BAW, da die tatsächlich vorhandenen Standardabweichungen in der Regel bereits deutlich höher sind, als durch die Spanne k nach Ansatz B der DIN EN 13791 abgedeckt ist (Bild 4). Die Spanne k setzt sich zusammen aus der Standardabweichung und einem weiteren Faktor, der nach Ansatz A 1,48 beträgt. Die Spanne k beinhaltet also Standardabweichungen zwischen 3,4 ($k=5$) und 4,7 ($k=7$). Dies liegt bei Bestandsbauwerken deutlich auf der unsicheren Seite.

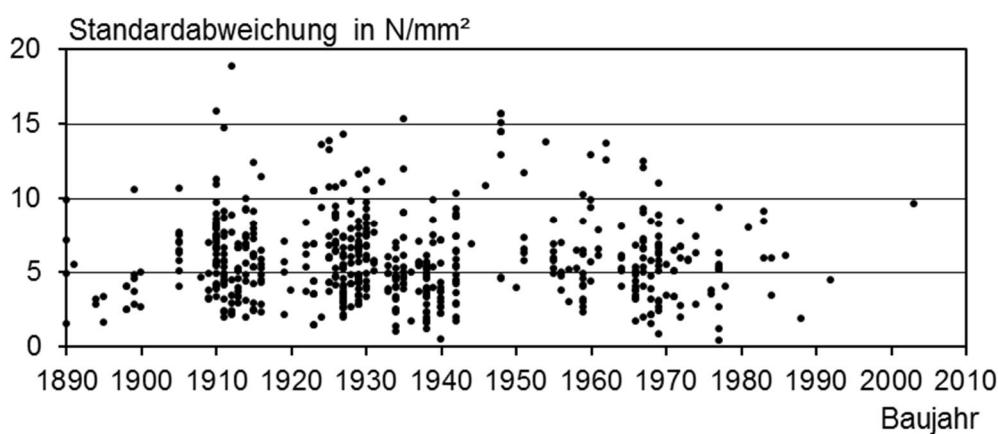


Bild 4: Standardabweichung der Bauwerksdruckfestigkeit ($h/d=2$, Nass)

Alternative Vorgehensweisen werden in DIN EN 1990:2010-12 aufgezeigt, welche in der Nachrechnungsrichtlinie (BMVBS, 2011) oder dem DBV-Merkblatt „Modifizierte Teilsicherheitsbeiwerte für Stahlbetonbauteile“ (DBV, 2013) Anwendung finden. Die Vorgehensweise steht jedoch in der Kritik, da dort ein Vertrauensbereich von 75 % angedeutet wird, durch das Berechnungsprinzip aber nicht erreicht wird (Fischer, 2006; Schäper, 2010). Ein Widerspruch zu dieser Kritik ist nicht bekannt. Für die Festlegungen im BAW-Merkblatt wurden daher entsprechend der Vorgehensweise in (Fischer, 1995) k -Werte für einen Vertrauensbereich von 95 % festgelegt. Weiterhin ist in der

Regel analog zu (DBV, 2013) von einer logarithmischen Normalverteilung der Prüfergebnisse auszugehen. Die Kennwerte werden wie folgt ermittelt:

$$\text{Mittelwert: } m_y = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln x_i$$

$$\text{Standardabweichung: } s_y = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (\ln x_i - m_y)^2}$$

$$\text{Variationskoeffizient: } V_y = \sqrt{e^{s_y^2} - 1}$$

Die Bestimmung der charakteristischen Werte X_k aus den Ergebnissen der Laborversuche erfolgt nach folgendem Zusammenhang in Verbindung mit Tabelle 3:

$$X_k = \exp(m_y - k_n \cdot s_y)$$

Tabelle 3: Fraktilenfaktor k_n in Abhängigkeit von der Probekörperanzahl
 (95 %-Vertrauensintervall, Standardabweichung unbekannt)

n	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	20	30	100	∞
k_n	6,36	4,65	3,94	3,54	3,28	3,10	2,96	2,86	2,76	2,70	2,64	2,59	2,54	2,38	2,21	1,93	1,64

Neben der Druckfestigkeit ist häufig die Zugfestigkeit des Betons für die Bewertung der Tragfähigkeit erforderlich. Aufgrund der im vorangegangenen Abschnitt erläuterten Zusammenhänge muss die Zugfestigkeit über die Spaltzugfestigkeit gesondert ermittelt werden und darf nicht aus der Druckfestigkeit abgeleitet werden. Die Zugfestigkeit lässt sich entsprechend DIN EN 1992-1-1 wie folgt aus der Spaltzugfestigkeit ermitteln:

$$f_{ct} = 0,9 f_{ct,sp}$$

Die charakteristische Zugfestigkeit wird anschließend auf gleiche Weise wie die Druckfestigkeit bestimmt.

4 Ausblick

Die Vorgehensweise zur Ermittlung charakteristischer Kennwerte gemäß dem vorliegenden Merkblattentwurf befindet sich derzeit in der probeweisen Anwendung im Bereich der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes. Weiterführende Erkenntnisse aus dieser Probeanwendung werden vor der künftigen ersten uneingeschränkt vorliegenden Fassung aufgenommen. Im Rahmen der Bearbeitung am Merkblattentwurf wurden umfangreiche Auswertungen von Bauwerksdaten durchgeführt. Diese Untersuchungen werden in Kürze umfänglicher als hier geschehen veröffentlicht.

5 Literatur

- Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS), 2011: Richtlinie für die Nachrechnung von Straßenbrücken im Bestand (Nachrechnungsrichtlinie). Ausgabe 05/2011
- Bundesanstalt für Wasserbau: BAW-Merkblatt Bohrkernentnahme für Bauwerksuntersuchungen (MBK), Ausgabe 2012
- DIN EN 13791:2008-05: Bewertung der Druckfestigkeit von Beton in Bauwerken oder in Bauwerksteilen; Deutsche Fassung EN 13791:2007. Beuth Verlag, Berlin
- DIN EN 1990:2010-12: Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung; Deutsche Fassung EN 1990:2002 + A1:2005 + A1:2005/AC:2010 Beuth Verlag, Berlin
- DIN EN 1992-1-1:2011-01: Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken - Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau; Deutsche Fassung EN 1992-1-1:2004 + AC:2010. Beuth Verlag, Berlin
- DIN 1045-1:2008-08 (zurückgezogen): Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton –Teil 1: Bemessung und Konstruktion. Beuth Verlag, Berlin
- Fischer, L.: Europäische Baunormen im Test - Charakteristische Werte nach DIN EN 1990, DIN EN 1926 und DIN EN 13162. Bautechnik 83 (2006), Nr. 5, S. 351-364
- Loch, M.; Stauder, F.; Schnell, J.: Bestimmung der charakteristischen Betonfestigkeit in Bestandstragwerken – Anwendungsgrenzen der DIN EN 13791. Beton- und Stahlbetonbau 106 (2011), Nr. 12, S.804-813
- Schäper, M.: Zur Anwendung der logarithmischen Normalverteilung in der Materialprüfung - Missverständliche Normaussagen ergeben fehlerhafte Nachweise. Bautechnik 87 (2010), Nr. 9, S. 541-549
- Schnell, J.; Loch, M.; Zilch, K; Dunkelberg, D.: Erläuterungen und Hintergründe zu den Werkstoffkennwerten der Nachrechnungsrichtlinie für bestehende Straßenbrücken aus Beton. Bauingenieur 87 (2012), Nr. 1, S.15-23
- Steenbergen, R.D.J.M.; Vervuurt, A.H.J.M.: Determining the in situ concrete strength of existing structures for assessing their structural safety. Structural Concrete 13 (2012), Nr. 1, S. 27-31