

# Die Bestimmung der Betondruckfestigkeit im Bestand – Herausforderungen und Lösungsvorschläge

Franz KNAB<sup>1</sup>, Christian SODEIKAT<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Ingenieurbüro Schießl Gehlen Sodeikat GmbH, München  
knab@ib-schiessl.de

**Kurzfassung.** Die Betondruckfestigkeit von Bestandsbauwerken ist eine in der Praxis häufig benötigte Größe. Solange nur ein Anhaltswert erforderlich ist, genügt die Auswertung vorhandener Planunterlagen mit Umrechnung der dortigen Angaben in heutige Druckfestigkeitsklassen. Für genauere Nachweise muss die Betondruckfestigkeit nachträglich bestimmt werden.

Gebräuchlich sind die Bewertungsverfahren nach der bauaufsichtlich eingeführten Norm DIN EN 13791:2008 [1] sowie eine Adaption der in DIN EN 1990 [2] beschriebenen Vorgehensweise zur Bestimmung charakteristischer Baustoffkennwerte. Die Beurteilung erfolgt üblicher Weise auf Basis von Bohrkernen, an denen im Labor die Druckfestigkeit bestimmt wird, ggf. ergänzt um zerstörungsfreie Prüfungen.

Wesentliche Herausforderungen für den beurteilenden Ingenieur sind neben der Sicherheit die Wirtschaftlichkeit und die Schonung des Bauwerks. Die letztgenannten Punkte bedingen, dass oft mit einem begrenzten Beprobungsumfang gearbeitet werden muss.

Jede Beprobung stellt nur eine Stichprobe der tatsächlichen Verteilung dar. Im Bestand ergibt sich deshalb oft das Problem, dass kleine Stichprobenumfänge auf erhöhte Streuungen der Festigkeit treffen. Die verschiedenen Normansätze sind hier unterschiedlich robust.

Wie gezeigt wird, hat DIN EN 13791:2008 bei größeren Streuungen erhebliche Schwächen: Die erreichten Aussagesicherheiten sind so gering und die systematischen Überschätzungen so hoch, dass die Ansätze für ältere Bestandsbauwerke - anders als bei neueren Bauwerken - häufig als ungeeignet anzusehen sind. Das Verfahren nach DIN EN 1990 führt in der Regel zu deutlich besser abgesicherten, jedoch bei sehr geringem Stichprobenumfang verfahrensbedingt unwirtschaftlichen Bewertungen. Schon allein deshalb ist ein Stichprobenumfang von mindestens 5 bis 7 Bohrkernen zu empfehlen. Mit E DIN EN 13791/A20:2016 werden neue Bewertungsansätze kommen, die letztlich eine Annäherung an DIN EN 1990 darstellen. Ob diese wesentliche Verbesserungen bringen, bleibt abzuwarten.

Kein realistischer Bewertungsansatz kann erhebliche Fehlbewertungen infolge statistischer Streuungen bei der Beprobung gänzlich ausschließen. Ein statistisches Verfahren kann deshalb niemals eine Plausibilisierung der Ergebnisse ersetzen.

Die Beurteilung muss fachkundig vorbereitet, begleitet und ausgewertet werden. Eine sinnvolle Vorgehensweise wird vorgeschlagen. Zerstörungsfreie Untersuchungen mit einem Rückprallhammer stellen mitunter ein wichtiges Hilfswerkzeug dar.

## Einführung

Baumaßnahmen im Bestand, Schadensanalysen oder auch einfach Zweifel an der Herstellungsqualität neuer Bauteile können eine nachträgliche Bestimmung der Betondruckfestigkeit erfordern.

Der Ingenieur steht einerseits vor der Herausforderung, dass die Beurteilung sicher sein muss, d.h. erhebliche Über- oder Unterschätzungen ausreichend zuverlässig vermieden werden. Andererseits muss das Ergebnis aber auch wirtschaftlich im Sinne möglichst wenig unnötiger Sicherheitsabschläge und Beprobungskosten sein und zur Schonung der Bausubstanz auf Basis einer möglichst kleinen Menge zerstörender Untersuchungen gewonnen werden. Die Beurteilung ist in diesem Spannungsfeld nicht immer einfach, aber trotzdem eine lösbare Aufgabe.

## 1 Die Betondruckfestigkeit

Die Betondruckfestigkeit beschreibt die Tragkraft eines Betons je Querschnittsfläche. Sie wird an Probekörpern bestimmt. Die Größe und Geometrie dieser Probekörper und der Grad der Wassersättigung bei der Prüfung haben einen erheblichen Einfluss auf das Prüfergebnis.

Die Betondruckfestigkeit wird für praktische Zwecke in sogenannten Druckfestigkeitsklassen angegeben. Dem jeweiligen Stand der Wissenschaft und Technik folgend wurde die Benennung der Betondruckfestigkeit über die Jahrzehnte immer wieder verändert. Heute wird die Betondruckfestigkeitsklasse mit C für „concrete“, gefolgt von zwei durch einen Schrägstrich getrennten Zahlen bezeichnet. Die erste Zahl gibt das 5%-Quantil der Druckfestigkeit eines bis zur Prüfung wassergelagerten zylindrischen Probekörpers mit 150 mm Durchmesser und 300 mm Höhe in  $[N/mm^2]$  an, die zweite Zahl das entsprechende 5%-Quantil der Druckfestigkeit eines Würfels mit 150 mm Kantenlänge.

Werden Angaben zur Betondruckfestigkeiten aus älteren Planunterlagen und Akten heute verwendet, müssen dort angegebene Druckfestigkeitsklassen erst auf die heute gebräuchlichen Werte umgerechnet werden. Umrechnungsformeln und entsprechende Tabellenwerte können diversen Veröffentlichungen entnommen werden, vgl. beispielsweise [3] und [4].

Die Betondruckfestigkeit unterliegt Schwankungen. Bei mittleren bis höheren Betondruckfestigkeiten folgt die Verteilung in guter Näherung einer Normalverteilung, bei geringen Festigkeiten eher einer Lognormalverteilung, vgl. [5], wobei die Unterschiede zwischen beiden Verteilungen im relevanten Bereich gering sind. Die Standardabweichung liegt für die meisten Betone zwischen etwa 2  $N/mm^2$  und etwa 8  $N/mm^2$ . Unter- und Überschreitungen sind möglich. Maßgebend für die Standardabweichung ist vor allem die Ausführungsqualität, weniger die mittlere Druckfestigkeit, vgl. Abb. 1.

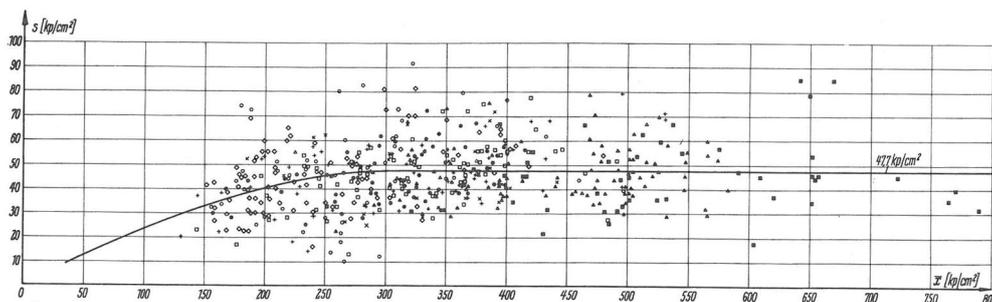


Abb. 1. Standardabweichung der Betondruckfestigkeit in Abhängigkeit der mittleren Betondruckfestigkeit, Quelle: [5]

## 2 Die Bestimmung der Betondruckfestigkeit im Bestand

### 2.1 Allgemeines

Für die Bestimmung der Betondruckfestigkeit stehen verschiedene Ansätze zur Verfügung. Gebräuchlich sind vor allem die in der für die Druckfestigkeitsbestimmung im Bestand bauaufsichtlich eingeführten DIN EN 13791:2008 angegebenen Verfahren und ein Ansatz auf Basis von DIN EN 1990.

Für die Bewertung werden üblicher Weise zunächst Proben in Form von Bohrkernen aus einem Bauwerk oder Bauteil entnommen und daran definierte Festigkeitswerte im Labor ermittelt. Aus dieser Stichprobe wird auf Basis verschiedener Berechnungsvorschriften die charakteristische Druckfestigkeit  $f_{ck, is}$  des Bauwerksbetons abgeschätzt. Dieser Wert wird wiederum einer Druckfestigkeitsklasse und der dazugehörigen charakteristischen Druckfestigkeit  $f_{ck}$  zugeordnet.  $f_{ck, is}$  und  $f_{ck}$  sind nicht identisch, da im Sicherheitskonzept bereits berücksichtigt ist, dass Beton im Bauwerk nicht die volle Druckfestigkeit von Laborbeton erreicht.  $f_{ck, is}$  muss nur 85% von  $f_{ck}$  erreichen, damit ein Beton einer dazugehörigen Druckfestigkeitsklasse zugeordnet werden darf.

Aus den aus dem Bauwerk entnommenen Bohrkernen mit Durchmessern zwischen 50 mm und 150 mm werden für die Prüfung Probekörper mit Verhältnissen von Höhe zu Durchmesser  $h/d = 2$  oder  $h/d = 1$  herausgearbeitet. Die daran ermittelten Festigkeitswerte werden entsprechend den Angaben in DIN EN 13791:2008 zunächst auf äquivalente Zylinder- oder Würfeldruckfestigkeiten umgerechnet. Mit diesen Werten wird dann  $f_{ck, is}$  berechnet. Bei  $f_{ck, is}$  kann es sich also um eine Zylinder- oder eine Würfeldruckfestigkeit handeln. Dies ist im Hinblick auf Zuordnung zur Druckfestigkeitsklasse oder bei einer direkten Verwendung von  $f_{ck, is}$ , beispielsweise nach [6] unbedingt zu beachten.

### 2.2 Ansätze nach DIN EN 13791

DIN EN 13791 bietet verschiedene Ansätze auf Basis von Bohrkernentnahme, kalibrierten indirekten Methoden und in Deutschland auch auf Basis alleiniger Rückprallhammerprüfungen. Das Standardverfahren ist die Bewertung anhand von Bohrkernen. DIN EN 13791:2008 bietet hier abhängig von der Anzahl der zur Verfügung stehenden Messwerte zwei Ansätze A und B.

Gemäß Ansatz A (ab 15 Bohrkernen) errechnet sich die charakteristische Betondruckfestigkeit wie folgt:

$$f_{ck, is} = \min \begin{cases} f_{m(n), is} - 1,48 \cdot s \\ f_{is, niedrigst} + 4 \end{cases} \quad (1)$$

Dabei ist

|                     |   |
|---------------------|---|
| $f_{ck, is}$        | die charakteristische Druckfestigkeit des Bauwerksbetons                                  |
| $f_{m(n), is}$      | die mittlere Druckfestigkeit der n Prüfergebnisse   |
| $f_{is, niedrigst}$ | der kleinste Einzelwert der Prüfergebnisse  |
| s                   | die Stichprobenstandardabweichung der Prüfergebnisse<br>(mit $s \geq 2 \text{ N/mm}^2$ ). |

Für Ansatz B (3 bis 14 Bohrkern) gilt:

$$f_{ck, is} = \min \begin{cases} f_{m(n), is} - k \\ f_{is, niedrigst} + 4 \end{cases} \quad (2)$$

Dabei ist k eine von der Anzahl der Prüfergebnisse abhängige Spanne:

$$\begin{aligned} n = 3 \text{ bis } 6 & \rightarrow k = 7 \\ n = 7 \text{ bis } 9 & \rightarrow k = 6 \\ n = 10 \text{ bis } 14 & \rightarrow k = 5. \end{aligned}$$

Sofern  $f_{ck, is}$  mit Bohrkernen mit  $h/d = 2/1$  bestimmt wurde, ist  $f_{ck, is}$  als äquivalente „Zylinderdruckfestigkeit“ zu sehen und wird daher auch mit  $f_{ck, is, Zylinder}$  bezeichnet. Bei  $h/d = 1/1$  wird  $f_{ck, is}$  analog auch mit  $f_{ck, is, Würfel}$  bezeichnet.

Auf die kalibrierten indirekten Methoden und die alleinige Rückprallhammerprüfung wird nachfolgend nicht weiter eingegangen, da die Anwendung dieser Verfahren eher auf Ausnahmen begrenzt und damit vor allem bei älteren Bauwerken weniger relevant ist.

### 2.3 Ansatz nach DIN EN 1990

DIN EN 1990 bietet im informativen Anhang D.7 ein Verfahren zur Abschätzung charakteristischer Baustoffeigenschaften. Für die Randbedingungen unbekannter Mittelwert und unbekannter Variationskoeffizient gilt danach bei normalverteilten Eigenschaften:

$$X_k = m_x - k_n \cdot s_x \quad (3)$$

Mit:

$X_k$  Schätzwert für die charakteristische Eigenschaft  
(5%-Quantil; entspricht im Prinzip  $f_{ck, is}$  analog DIN EN 13791)

$m_x$  Mittelwert der n Prüfergebnisse  $x_i$

$s_x$  Stichprobenstandardabweichung der n Prüfergebnisse  $x_i$

$$s_x = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum (x_i - m_x)^2} \quad (4)$$

$k_n$  von der Anzahl n der Prüfergebnisse abhängiger, in DIN EN 1990 tabellierter Koeffizient.

Sofern die Eigenschaft lognormalverteilt ist, gilt:

$$X_k = e^{m_y - k_n \cdot s_y} \quad (5)$$

Mit:

$m_y$  Mittelwert der n logarithmierten Prüfergebnisse  $x_i$

$$m_y = \frac{1}{n} \sum \ln(x_i) \quad (6)$$

$s_y$  Stichprobenstandardabweichung der n logarithmierten Prüfergebnisse  $x_i$

$$s_y = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum (\ln(x_i) - m_y)^2} \quad (7)$$

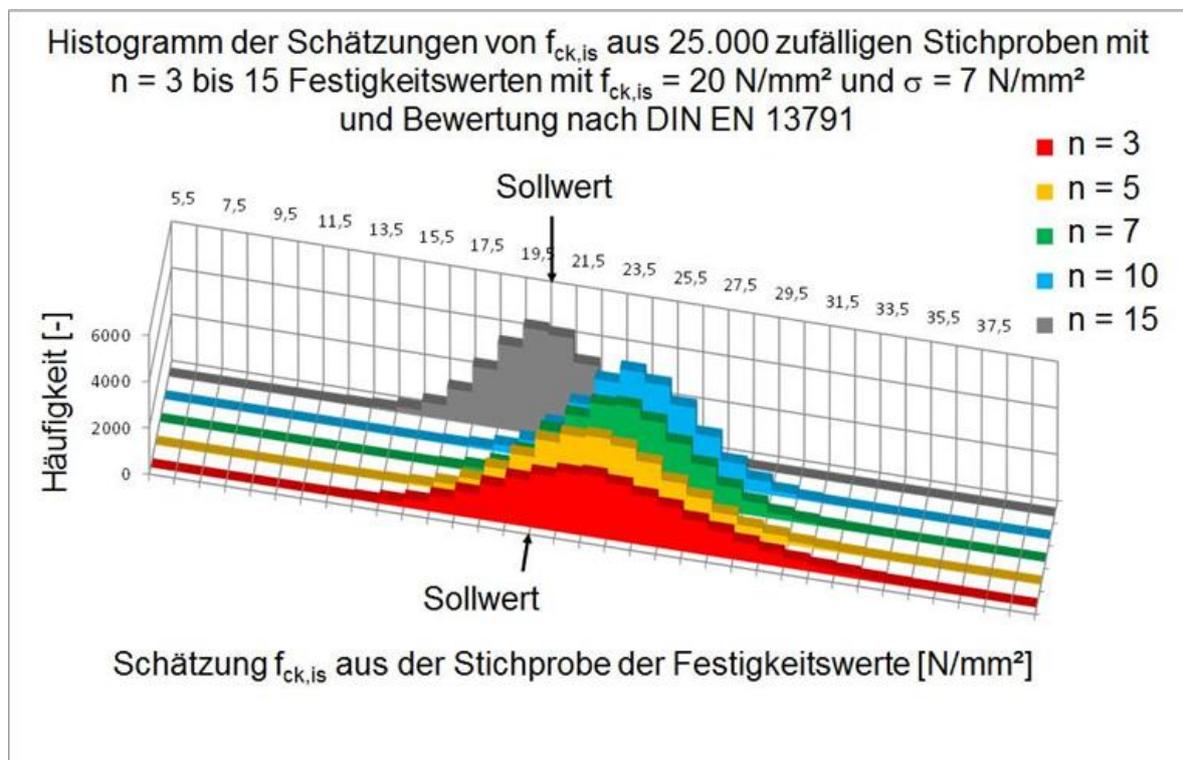
In DIN EN 1990 wird ferner empfohlen, einen Mindestvariationskoeffizienten von 10% anzusetzen. Bei lognormalverteilten Festigkeiten muss hierzu  $s_y \geq 0,1$  angesetzt werden.  $X_k$  entspricht  $f_{ck, is}$ . Eine Zuordnung zu Druckfestigkeitsklassen erfolgt ab hier analog DIN EN 13791.

### 3 Herausforderungen

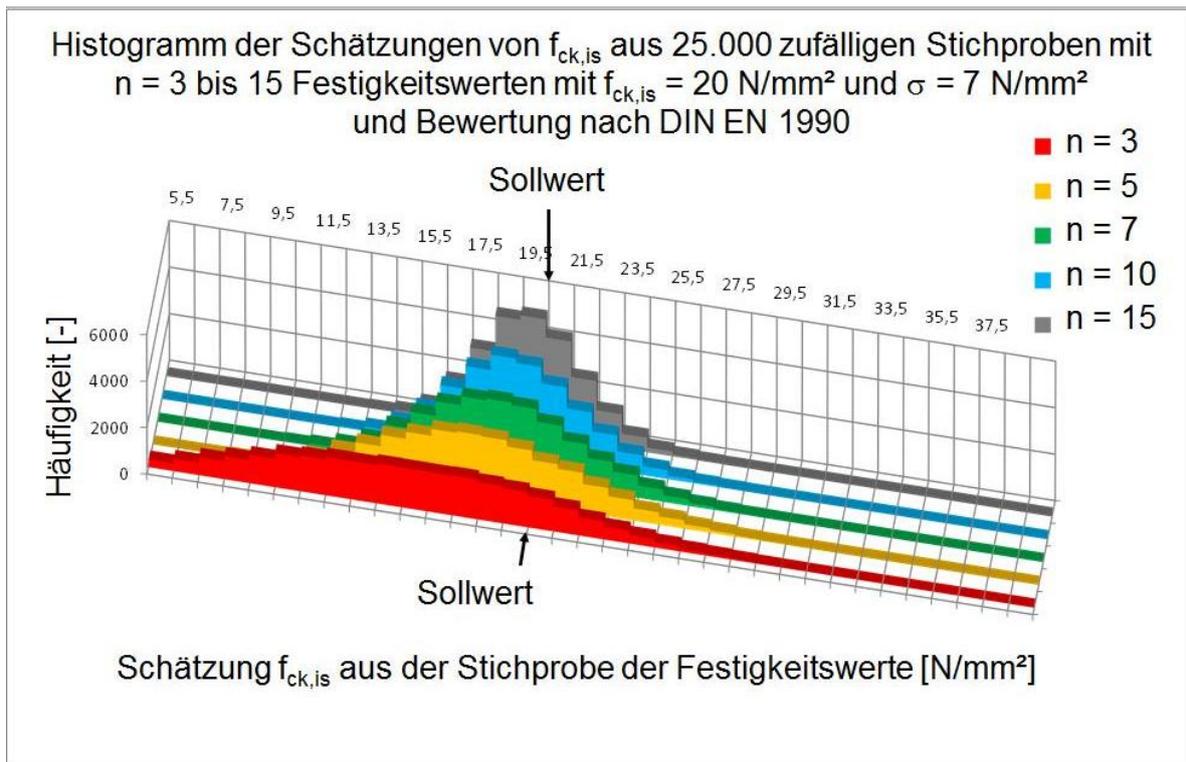
Zielsetzung einer Beprobung sollte sein, mit möglichst geringem Aufwand eine ausreichend zuverlässige Abschätzung der charakteristischen Betondruckfestigkeit zu erhalten, ohne dass unwirtschaftlich hohe Sicherheitsabschläge in Kauf genommen werden müssen.

Die zentrale Herausforderung der sicheren Beurteilung bei geringem Beprobungsumfang wird durch die Streuung der Betondruckfestigkeit erheblich erschwert. Sie bewirkt, dass auch jede Beprobung und die daraus resultierende Abschätzung der charakteristischen Betondruckfestigkeit erheblichen Schwankungen unterliegt. Die Qualität eines Verfahrens zur Abschätzung der charakteristischen Betondruckfestigkeit muss deshalb auch mit der erreichten Aussagesicherheit verknüpft werden. Für Beton ist eine geforderte Aussagesicherheit von rd. 75% gebräuchlich.

Da verschiedene Verfahren zur Bewertung zur Verfügung stehen und DIN EN 13791:2008 nicht unumstritten ist, vgl. auch [7], wurden systematische numerische Simulationen durchgeführt, welche die erreichten Aussagesicherheiten von DIN EN 13791:2008 und DIN EN 1990 unter verschiedenen Randbedingungen untersuchen sollten. Wesentliche Ergebnisse können [4] und [8] sowie exemplarisch Abb. 2, Abb. 3, Tabelle 1 und Tabelle 2 entnommen werden.



**Abb. 2.** Histogramme der aus den Stichproben einer numerischen Simulationen berechneten Schätzungen von  $f_{ck, is}$  für einen Beton mit  $f_{ck, is, \text{Würfel}} = 20 \text{ N/mm}^2$  ( $\sigma = 7 \text{ N/mm}^2$ ) bei verschiedenen Stichprobenumfängen und Abschätzung nach DIN EN 13791; Quelle [8]



**Abb. 3.** Histogramme der aus den Stichproben einer numerischen Simulationen berechneten Schätzungen von  $f_{ck, is}$  für einen Beton mit  $f_{ck, is, \text{Würfel}} = 20 \text{ N/mm}^2$  ( $\sigma = 7 \text{ N/mm}^2$ ) bei verschiedenen Stichprobenumfängen und Abschätzung nach DIN EN 1990; Quelle [8]

**Tabelle 1.** Exemplarische Ergebnisse einer numerischen Simulation zur Abschätzung der charakteristischen Betondruckfestigkeit anhand des Normansatzes in **DIN EN 13791:2008** mit 25.000 Stichproben mit  $n = 3$  bis 15 Bohrkernen bei vorgegebener Grundgesamtheit; Festigkeitswerte in  $[\text{N/mm}^2]$ ; Quelle: [8]

| Beton   | Parameter                                | $n = 3$ | $n = 5$ | $n = 7$ | $n = 11$ | $n = 15$ |
|---|--|---------|---------|---------|----------|----------|
| $f_{ck, is, \text{Würfel}} = 20 \text{ N/mm}^2$<br>$\sigma = 7 \text{ N/mm}^2$<br>lognormalv. | Mittlere Schätzung                       | 22,9    | 22,8    | 23,5    | 23,8     | 19,8     |
|   | Mittlere Schätzung 5%-Quantil            |         |         |         |          |          |
|   | Mittlere Schätzung 5%-Quantil / Sollwert | 114%    | 114%    | 117%    | 119%     | 99%      |
|   | Erreichte Aussagesicherheit              | 24%     | 18%     | 8%      | 5%       | 52%      |
| $f_{ck, is, \text{Würfel}} = 37 \text{ N/mm}^2$<br>$\sigma = 3 \text{ N/mm}^2$<br>lognormalv. | Mittlere Schätzung                       | 34,8    | 34,8    | 35,8    | 36,7     | 37,4     |
|   | Mittlere Schätzung 5%-Quantil            |         |         |         |          |          |
|   | Mittlere Schätzung 5%-Quantil / Sollwert | 94%     | 94%     | 97%     | 99%      | 101%     |
|   | Erreichte Aussagesicherheit              | 90%     | 95%     | 86%     | 61%      | 36%      |

**Tabelle 2.** Exemplarische Ergebnisse einer numerischen Simulation zur Abschätzung der charakteristischen Betondruckfestigkeit anhand des Normansatzes in **DIN EN 1990** mit 25.000 Stichproben mit  $n = 3$  bis 15 Bohrkernen bei vorgegebener Grundgesamtheit; Festigkeitswerte in [N/mm<sup>2</sup>]; Quelle: [8]

| Beton   | Parameter                                   | n = 3 | n = 5 | n = 7 | n = 11 | n = 15 |
|---|---|-------|-------|-------|--------|--------|
| $f_{ck, is, \text{Würfel}} = 20 \text{ N/mm}^2$<br>$\sigma = 7 \text{ N/mm}^2$<br>lognormalv. | Mittlere Schätzung<br>5%-Quantil            | 15,2  | 17,9  | 18,7  | 19,1   | 19,4   |
|   | Mittlere Schätzung 5%-<br>Quantil /Sollwert | 76%   | 90%   | 93%   | 96%    | 97%    |
|   | Erreichte<br>Aussagesicherheit              | 82%   | 72%   | 68%   | 65%    | 63%    |
| $f_{ck, is, \text{Würfel}} = 37 \text{ N/mm}^2$<br>$\sigma = 3 \text{ N/mm}^2$<br>lognormalv. | Mittlere Schätzung<br>5%-Quantil            | 29,4  | 32,9  | 33,8  | 34,3   | 34,7   |
|   | Mittlere Schätzung 5%-<br>Quantil /Sollwert | 80%   | 89%   | 91%   | 93%    | 94%    |
|   | Erreichte<br>Aussagesicherheit              | >99%  | >99%  | >99%  | >99%   | >99%   |

Die Simulation zeigt, dass DIN EN 13791:2008 vor allem bei Beton mit eher geringer Betondruckfestigkeit und erhöhter Streuung die tatsächliche charakteristische Betondruckfestigkeit systematisch überschätzt und eine sehr schlechte Aussagesicherheit bringt. Das Verfahren nach DIN EN 1990 zeigt hier eine deutlich bessere Sicherheit, neigt bei geringen Stichprobenumfängen ( $n = 3$ ) allerdings zu einem relativ hohen Sicherheitsabschlag von im Mittel über 20%.

Naturgemäß kann keines der beiden Verfahren eine völlige Sicherheit gegen mitunter erhebliche Überschätzungen bieten. Zur Beurteilung, wie groß die Neigung zu erheblichen Überschätzungen ist, wurden die Ergebnisse der Simulationsrechnung einer weiteren Analyse daraufhin unterzogen, wie hoch bei geringem bis mittlerem Stichprobenumfang der Anteil einer Überschätzung von  $f_{ck, is}$  um mindestens 5 N/mm<sup>2</sup> ist, also etwa eine Festigkeitsklasse. Diese Grenze wird als problematisch gesehen, weil  $f_{ck, is}$  ohnehin nur 85% von  $f_{ck}$  erreichen muss und damit bei geringen bis mittleren Druckfestigkeiten die Teilsicherheit für den Beton von 1,5 weitgehend verbraucht wäre. Die Ergebnisse dieser Analysen zeigt Tabelle 3.

**Tabelle 3.** Exemplarische Ergebnisse einer numerischen Simulation zur Analyse des Anteils erheblicher Überschätzungen einer Betondruckfestigkeitsbewertung nach **DIN EN 13791:2008** und **DIN EN 1990**

| Beton   | Parameter  | n = 3 | n = 5 | n = 7 |
|---|--|-------|-------|-------|
| $f_{ck, is, \text{Würfel}} = 20 \text{ N/mm}^2$<br>$\sigma = 7 \text{ N/mm}^2$<br>lognormalv. | Anteil mit $f_{cm, is} > f_{cm} + 5 \text{ N/mm}^2$                                  | 11%   | 6%    | 4%    |
|   | Anteil mit $f_{ck, is} > f_{ck} + 5 \text{ N/mm}^2$ nach<br><b>DIN EN 13791:2008</b> | 28%   | 22%   | 26%   |
|   | Anteil mit $f_{ck, is} > f_{ck} + 5 \text{ N/mm}^2$ nach<br><b>DIN EN 1990</b>       | 2%    | 3%    | 2%    |
| $f_{ck, is, \text{Würfel}} = 37 \text{ N/mm}^2$<br>$\sigma = 3 \text{ N/mm}^2$<br>lognormalv. | Anteil mit $f_{cm, is} > f_{cm} + 5 \text{ N/mm}^2$                                  | 0,3%  | <0,1% | <0,1% |
|   | Anteil mit $f_{ck, is} > f_{ck} + 5 \text{ N/mm}^2$ nach<br><b>DIN EN 13791:2008</b> | <0,1% | <0,1% | <0,1% |
|   | Anteil mit $f_{ck, is} > f_{ck} + 5 \text{ N/mm}^2$ nach<br><b>DIN EN 1990</b>       | <0,1% | <0,1% | <0,1% |

Tabelle 3 zeigt, dass bei DIN EN 13791:2008 bei Betonen mit eher geringer Druckfestigkeit und erhöhten Streuungen bei rund einem Viertel der Bewertungen erhebliche Überschätzungen liefert. DIN EN 1990 bringt hier dramatisch robustere Ergebnisse, selbstverständlich ohne das Risiko einer erheblichen Überschätzung vollständig ausschließen zu können. Ein statistisches Verfahren kann niemals eine fachkundige Plausibilisierung der Ergebnisse ersetzen. Fasst man die Ergebnisse der Analysen qualitativ zusammen, ergibt sich die in Tabelle 4 zusammengefasste Matrix zur Leistungsfähigkeit der Verfahren.

Das Ergebnis bedeutet nicht, dass DIN EN 13791:2008 völlig unbrauchbar wäre. Wie Tabelle 4 zeigt, liefern die Verfahren nach DIN EN 13791 bei Betonen mit eher geringen Streuungen mitunter bessere Ergebnisse als das Verfahren nach DIN EN 1990, vor allem im Hinblick auf die Wirtschaftlichkeit im Sinne möglichst geringer Sicherheitsabschläge. Dies ist einer der Gründe, weshalb man sich, wie auch in [8] beschrieben, stets Gedanken darüber machen sollte, welche Qualität des Betons realistisch zu erwarten ist.

**Tabelle 4.** Qualitative Einschätzung zur Leistungsfähigkeit der Bewertungsverfahren nach DIN EN 13791:2008 und nach DIN EN 1990 bei verschiedenen Randbedingungen (mäßige Betonqualität repräsentiert durch Beton mit  $f_{ck, is, \text{Würfel}} = 20 \text{ N/mm}^2$  bei  $\sigma = 7 \text{ N/mm}^2$ ; gute Betonqualität repräsentiert durch Beton mit  $f_{ck, is, \text{Würfel}} = 37 \text{ N/mm}^2$  bei  $\sigma = 3 \text{ N/mm}^2$ )

| Beton   | Parameter             | n = 3   | n = 5 | n = 7 | n = 11 | n = 15 |
|---|-----------------------|---|-------|-------|--------|--------|
| $f_{ck, is, \text{Würfel}} = 20 \text{ N/mm}^2$<br>$\sigma = 7 \text{ N/mm}^2$<br>lognormalv.<br><b>DIN EN 13791:2008</b> | Sicherheit            | --  | --    | --    | --     | -      |
|   | Wirtschaftlichkeit    | Aufgrund der schlechten Sicherheit nicht mehr relevant. |       |       |        |        |
|   | Schonung des Bauwerks |   |       |       |        |        |
| $f_{ck, is, \text{Würfel}} = 37 \text{ N/mm}^2$<br>$\sigma = 3 \text{ N/mm}^2$<br>lognormalv.<br><b>DIN EN 13791:2008</b> | Sicherheit            | ++  | ++    | ++    | +      | +      |
|   | Wirtschaftlichkeit    | +   | +     | ++    | ++     | ++     |
|   | Schonung des Bauwerks | ++  | +     | ○     | -      | --     |
| $f_{ck, is, \text{Würfel}} = 20 \text{ N/mm}^2$<br>$\sigma = 7 \text{ N/mm}^2$<br>lognormalv.<br><b>DIN EN 1990</b>       | Sicherheit            | ○   | ○     | ○     | ○      | +      |
|   | Wirtschaftlichkeit    | -   | ○     | ○     | +      | +      |
|   | Schonung des Bauwerks | ++  | +     | ○     | -      | --     |
| $f_{ck, is, \text{Würfel}} = 37 \text{ N/mm}^2$<br>$\sigma = 3 \text{ N/mm}^2$<br>lognormalv.<br><b>DIN EN 1990</b>       | Sicherheit            | ++  | ++    | ++    | ++     | ++     |
|   | Wirtschaftlichkeit    | -   | ○     | ○     | +      | +      |
|   | Schonung des Bauwerks | ++  | +     | ○     | -      | --     |

Aus den Ergebnissen wird ferner sichtbar, dass ein Stichprobenumfang von  $n = 5$  bis 7 Bohrkernen einen guten Kompromiss zwischen Sicherheit, Wirtschaftlichkeit und Schonung des Bauwerks bringt, während ein Stichprobenumfang von  $n = 3$  bei Anwendung von DIN EN 1990 im Mittel zu eher unwirtschaftlichen, weil im Mittel zu geringen Schätzwerten führt.

Mit der kommenden E DIN EN 13791/A20:2016 werden sich Änderungen an Verfahren A und B ergeben, insbesondere ist eine Annäherung an DIN EN 1990 vorgesehen. Erfahrungen liegen allerdings noch nicht vor.

#### 4 Eine sinnvolle Vorgehensweise bei der Beurteilung

Aus den Erfahrungen der Autoren und den vorgenannten Ergebnissen kann das in Tabelle 5 zusammengestellte und erläuterte Vorgehen bei einer Beurteilung als sinnvoll angesehen werden. Weitere Hinweise können auch [1], [4] und [8] entnommen werden.

Im Zusammenhang mit dem Festlegen der Beprobungsbereiche und dem Verschaffen eines Überblicks über die wahrscheinliche Grundgesamtheit wird an dieser Stelle ausdrücklich auf den großen Nutzen der Rückprallhammerprüfung hingewiesen, die - zugängliche Betonoberflächen vorausgesetzt - einen schnellen Überblick über die Vergleichbarkeit des Betons verschiedener Bauwerksbereiche liefern kann. Für Einzelheiten im Zusammenhang mit der Rückprallhammerprüfung wird auf [4] verwiesen.

**Tabelle 5.** Sinnvolle Vorgehensweise bei der Beurteilung von Betondruckfestigkeiten

| Schritt  | Hintergrund   |
|--|---|
| Eingrenzen des Untersuchungsbereichs   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Konzentration auf die wesentlichen Bereiche.</li> <li>• Minimierung des Beprobungsaufwands.</li> </ul>   |
| Recherchen in Akten und Planunterlagen   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Vorinformationen zur möglichen Verteilung der Grundgesamtheit.</li> <li>• Vorinformation zur späteren Plausibilisierung.</li> <li>• Minimierung des Beprobungsaufwands.</li> </ul> |
| Voruntersuchung zur Verteilung der Grundgesamtheit, beispielsweise mittels Rückprallhammer   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Minimierung des Beprobungsaufwands.</li> <li>• Verbesserung der Aussagesicherheit.</li> </ul>  |
| Abstimmung mit der Tragwerksplanung  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Minimierung des Beprobungsaufwands.</li> <li>• Vorinformationen zu den möglichen Bohrkernentnahmestellen.</li> <li>• Vorinformationen für die spätere Bewertung.</li> </ul>        |
| Festlegen der Prüfstellen und des Bohrkerndurchmessers, Einmessen der Bewehrung, Entnahme der Bohrkern   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Optimierung des Beprobungsaufwands.</li> <li>• Minimierung der Bauwerksschädigung.</li> </ul>  |
| Inaugenscheinnahme der Bohrkern  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Plausibilisieren der Annahmen zur Grundgesamtheit.</li> <li>• Sicherstellen einwandfreier Prüfkörper.</li> </ul>   |
| Durchführung der Druckfestigkeitsprüfungen in einem zertifizierten Labor nach vorheriger Abstimmung der Beprobungsbereiche am Bohrkern                         | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Sicherstellen möglichst zuverlässiger Laborergebnisse.</li> </ul>  |
| Inaugenscheinnahme der Bohrkern nach der Prüfung und Abgleich der Ergebnisse mit den Erwartungen zur Grundgesamtheit, zum Festigkeitsniveau, zur Streuung etc. | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Plausibilisieren der Messergebnisse.</li> <li>• Klären einer ggf. erforderlichen Erhöhung des Untersuchungsumfangs.</li> </ul>   |
| Abschätzen der charakteristischen Druckfestigkeit nach verschiedenen Bewertungsansätzen, Klären der Ursachen möglicher Unterschiede im Ergebnis                | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Bessere Absicherung der Ergebnisse nach unten und oben.</li> <li>• Klären einer ggf. erforderlichen Erhöhung des Untersuchungsumfangs.</li> </ul>                                  |
| Finale Beurteilung der Grundgesamtheit unter Berücksichtigung der Anforderungen der Tragwerksplanung   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ggf. Erhöhung der Wirtschaftlichkeit des Ergebnisses ohne wesentliche Einbußen im Hinblick auf die Sicherheit.</li> </ul>  |

## 5 Beispiele

### 5.1 Beispiel 1: Druckfestigkeit tragender Bauteile für eine Instandsetzungsplanung

Für die Instandsetzung einer rd. 15 Jahre alten Tiefgarage musste die Betondruckfestigkeit von Stützen und Wänden bestimmt werden, um ggf. erforderliche Abstützmaßnahmen zu dimensionieren oder Pilgerschritte für den Betonabtrag und die Betonreprofilierung festzulegen. Zur Betondruckfestigkeit lagen keine Vorinformationen vor. Die Tiefgarage ist eingeschossig und mit 30 Stellplätzen moderat groß.

Nach Inaugenscheinnahme vor Ort und aufgrund zwischenzeitlicher Untersuchungsergebnisse zur Instandsetzungsplanung wurde vermutet, dass alle relevanten Betonbauteile zu einer Grundgesamtheit gehören. Für die Beprobung wurde entschieden, zunächst 6 Bohrkern mit einem Durchmesser von 50 mm zu entnehmen, 4 davon aus Stützen, 2 aus Wänden. Die Inaugenscheinnahme des Betongefüges der entnommenen Bohrkern ergab keine Hinweise auf verschiedene Grundgesamtheiten.

Die Ergebnisse der Laboruntersuchungen und der Beurteilung können Tabelle 6 entnommen werden. Die Bohrkerndruckfestigkeiten wurden zunächst entsprechend DIN EN 13791 mit dem Faktor 0,9 auf äquivalente Würfeldruckfestigkeiten umgerechnet. Anschließend wurden die Laborergebnisse einer Plausibilisierung unterzogen. Auch die Druckfestigkeiten geben keinen Hinweis auf verschiedene Grundgesamtheiten. Die Standardabweichung der Stichprobe liegt mit 7 N/mm<sup>2</sup> bei einem typischen Wert.

**Tabelle 6.** Laborergebnisse von Bohrkernuntersuchungen und Beurteilung für Beispiel 1

| Probe                   | $f_{c, is, BK50mm}$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | $f_{c, is, Würfel}$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | $\ln(f_{c, is, Würfel})$<br>[-] |
|-------------------------|---|---|---------------------------------|
| Bohrkern 1              | 68,8  | 61,9  | 4,126                           |
| Bohrkern 2              | 65,1  | 58,6  | 4,071                           |
| Bohrkern 3              | 57,1  | 51,4  | 3,939                           |
| Bohrkern 4              | 51,5  | 46,4  | 3,836                           |
| Bohrkern 5              | 58,3  | 52,5  | 3,960                           |
| Bohrkern 6              | 48,4  | 43,6  | 3,774                           |
| Mittelwert              |   | 52,4  | 3,951                           |
| Stichprobenstandardabw. |   | 7,00  | 0,134                           |
| Minimalwert             |   | 43,6  | 3,774                           |
| Messwertanzahl          |   | 6   | 6                               |

$f_{ck, is, Würfel}$  nach DIN EN 13791:2008 [N/mm<sup>2</sup>] 45,4 = C40/50

$f_{ck, is, Würfel}$  nach DIN EN 1990 (lognormvert.) [N/mm<sup>2</sup>] 38,9 = C35/45

Die Bewertung nach DIN EN 13791 würde zu Druckfestigkeitsklasse C40/50 führen, die Bewertung nach DIN EN 1990 für die Annahme lognormalverteilter Werte zu Druckfestigkeitsklasse C35/45.

Für die finale Bewertung wurde DIN EN 1990 als realistischer angesehen, da immerhin 2 von 6 Messwerten eine Würfeldruckfestigkeit von deutlich unter 50 N/mm<sup>2</sup> aufweisen und die erhebliche Streuung darauf hindeutet, dass DIN EN 13791 ggf. zu positiv schätzt (entsprechend der Analysen in [8] für diese Konstellation im Mittel um rd. 10%).

## 5.2 Beispiel 2: Druckfestigkeit tragender Bauteile für eine Instandsetzungsplanung

Für die Instandsetzung einer gut 10 Jahre alten Tiefgarage aufgrund von Chloridschäden musste die Betondruckfestigkeit von hoch belasteten Stützen bestimmt werden, um erforderliche Abstützmaßnahmen zu dimensionieren. Zur Betondruckfestigkeit lagen widersprüchliche Planangaben vor, die als Druckfestigkeitsklasse B25 oder B35 bzw. nach heutiger Benennung C20/25 oder C30/37 angaben. Die Bauteile betrafen nur einen moderat großen Teil des Gebäudes. Auf den Stützen stehen 8 Etagen. Die Maßnahme stand unter einem knappen zeitlichen Rahmen.

Für die Beurteilung wurden zunächst Vorüberlegungen angestellt. Erste durchgeführte Rückprallhammerprüfungen deuteten auf gewisse Schwankungen in der Qualität hin. Nach Inaugenscheinnahme und Abstimmung mit der Tragwerksplanung wurde entschieden, aus 2 der hochbelasteten Stützen je 3 Bohrkern zu entnehmen, um aufgrund des engen Zeitrahmens im Zweifel die Stützen einzeln bewerten zu können, ohne zusätzliche Proben ziehen zu müssen. Zur Schonung des Bauwerks wurden Bohrkern mit einem Durchmesser von 50 mm entnommen. Die Inaugenscheinnahme der entnommenen Bohrkern ergab noch keine Hinweise auf verschiedene Grundgesamtheiten.

Die Ergebnisse der Laboruntersuchungen können Tabelle 7 entnommen werden. Die Bohrkerndruckfestigkeiten wurden zunächst entsprechend DIN EN 13791 mit dem Faktor 0,9 auf äquivalente Würfeldruckfestigkeiten umgerechnet. Anschließend wurden die Laborergebnisse einer Plausibilisierung unterzogen. Hier zeigte sich, dass die beiden entnommenen Dreiergruppen deutlich unterschiedliche Betondruckfestigkeiten aufwiesen. Auf die Standardabweichung der Gesamtprobe war mit über 9 N/mm<sup>2</sup> in Anbetracht des noch nicht sehr alten Bauwerks ungewöhnlich hoch.

**Tabelle 7.** Laborergebnisse von Bohrkernuntersuchungen und erste Analysen für Beispiel 2

| Probe                   | $f_{c, is, BK50mm}$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | $f_{c, is, Würfel}$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | $\ln(f_{c, is, Würfel})$<br>[-] |
|-------------------------|---|---|---------------------------------|
| Bohrkern 1              | 71,4  | 64,3  | 4,163                           |
| Bohrkern 2              | 70,5  | 63,5  | 4,150                           |
| Bohrkern 3              | 72,5  | 65,3  | 4,178                           |
| Bohrkern 4              | 50,7  | 45,6  | 3,821                           |
| Bohrkern 5              | 54,5  | 49,1  | 3,893                           |
| Bohrkern 6              | 53,9  | 48,5  | 3,882                           |
| Mittelwert              |   | 56,0  | 4,014                           |
| Stichprobenstandardabw. |   | 9,18  | 0,166                           |
| Minimalwert             |   | 45,6  | 3,821                           |
| Messwertanzahl          |   | 6   | 6                               |

$f_{ck, is, Würfel}$  nach DIN EN 13791:2008 [N/mm<sup>2</sup>] 49,0 = C45/55

$f_{ck, is, Würfel}$  nach DIN EN 1990 (lognormvert.) [N/mm<sup>2</sup>] 38,6 = C35/45

Die beiden Stützen waren damit offensichtlich nicht einer gemeinsamen Grundgesamtheit zuzuordnen und wurden getrennt bewertet. Die Ergebnisse dieser Bewertung können Tabelle 8 entnommen werden. Für die erste Stütze hätte die Bewertung nach DIN EN 13791 Druckfestigkeitsklasse C55/67 ergeben, bei allerdings extrem geringer Standardabweichung. Eine Bewertung nach DIN EN 1990 hätte unter Berücksichtigung des Mindestvariationskoeffizienten von 10% zu C40/50 geführt, in diesem Fall deutlich weniger als C55/67. Für die zweite Stütze wurden nach DIN EN 13791 C35/45 bzw. nach

DIN EN 1990 C30/37 ermittelt. Auch hier waren die Streuungen innerhalb der Stichprobe sehr gering, so dass nach der Empfehlung in DIN EN 1990 der Mindestvariationskoeffizient von 10% angesetzt wurde.

Für die finale Beurteilung wurden festgelegt, dass für die Gesamtheit aller Stützen letztlich nur C30/37 angegeben werden kann. Dieser Wert lag einerseits in einem plausiblen Verhältnis zu den Vorinformationen über die Betondruckfestigkeit und andererseits deuteten die Ergebnisse der Rückprallhammerprüfungen auf Schwankungen hin, die gegen die Freigabe höherer Druckfestigkeiten ohne weitere Bohrkernentnahmen sprachen. Für diese war aufgrund des knappen zeitlichen Rahmens kein Spielraum, sie waren aber auch nicht nötig, da C30/37 aus Sicht der Tragwerksplanung ausreichend war. Bei Bedarf wäre es sehr gut möglich gewesen, die einzelne Stütze 1 der Druckfestigkeitsklasse C40/50 zuzuordnen.

Beispiel 2 zeigt eindrucksvoll, dass es sehr sinnvoll sein kann, aus einzelnen Stützen 3 Bohrkern zu entnehmen, um im Bedarfsfall einzelne Bauteile auch getrennt bewerten zu können. Gleichzeitig ist zu sehen, dass eine alleinige Beprobung von Stütze 1 ohne zusätzliche Beprobungen - wie hier durch die Rückprallhammerprüfungen und die Bohrkern aus Stütze 2 - zu kritischen Fehleinschätzungen in Bezug auf die Grundgesamtheit geführt hätte.

**Tabelle 8.** Laborergebnisse von Bohrkernuntersuchungen und getrennte Beurteilung für Beispiel 2

| Probe                   | $f_{c, is, BK50mm}$  | $f_{c, is, Würfel}$  | $\ln(f_{c, is, Würfel})$ |
|-------------------------|----------------------|----------------------|--------------------------|
|                         | [N/mm <sup>2</sup> ] | [N/mm <sup>2</sup> ] | [-]                      |
| Bohrkern 1              | 71,4                 | 64,3                 | 4,163                    |
| Bohrkern 2              | 70,5                 | 63,5                 | 4,150                    |
| Bohrkern 3              | 72,5                 | 65,3                 | 4,178                    |
| Mittelwert              |                      | 64,3                 | 4,164                    |
| Stichprobenstandardabw. |                      | 0,90                 | 0,100                    |
| Minimalwert             |                      | 63,5                 | 4,150                    |
| Messwertanzahl          |                      | 3                    | 3                        |

$f_{ck, is, Würfel}$  nach DIN EN 13791:2008 [N/mm<sup>2</sup>] 57,3 = C55/67

$f_{ck, is, Würfel}$  nach DIN EN 1990 (lognormvert.) [N/mm<sup>2</sup>] 45,9 = C40/50

| Probe                   | $f_{c, is, BK50mm}$  | $f_{c, is, Würfel}$  | $\ln(f_{c, is, Würfel})$ |
|-------------------------|----------------------|----------------------|--------------------------|
|                         | [N/mm <sup>2</sup> ] | [N/mm <sup>2</sup> ] | [-]                      |
| Bohrkern 4              | 50,7                 | 45,6                 | 3,821                    |
| Bohrkern 5              | 54,5                 | 49,1                 | 3,893                    |
| Bohrkern 6              | 53,9                 | 48,5                 | 3,882                    |
| Mittelwert              |                      | 47,7                 | 3,865                    |
| Stichprobenstandardabw. |                      | 1,84                 | 0,100                    |
| Minimalwert             |                      | 45,6                 | 3,821                    |
| Messwertanzahl          |                      | 3                    | 3                        |

$f_{ck, is, Würfel}$  nach DIN EN 13791:2008 [N/mm<sup>2</sup>] 40,7 = C35/45

$f_{ck, is, Würfel}$  nach DIN EN 1990 (lognormvert.) [N/mm<sup>2</sup>] 34,1 = C30/37

## Referenzen

- [1] DIN EN 13791: 2008-05: Bewertung der Druckfestigkeit von Beton in Bauwerken oder in Bauwerksteilen; Deutsche Fassung EN 13791:2007. Fassung Mai 2008. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2008.
- [2] DIN EN 1990: Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung; Deutsche Fassung EN 1990:2002 + A1:2005 + A1:2005/AC:2010. Ausgabe Dezember 2010. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2010.
- [3] FINGERLOOS, F.: Bauen im Bestand – Zuordnung historischer Betonfestigkeiten. In: Beton- und Stahlbetonbau 103 (2008), H. 4, S. 214-220. Berlin: Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG, 2008.
- [4] KNAB, F.: Bestimmung der Betondruckfestigkeit unter Einbeziehung der Rückprallhammerprüfung. In: DBV-Arbeitstagung „Schutz und Instandsetzung von Betonbauteilen – Regelwerke, Diagnoseverfahren, Praxisbeispiele“. Berlin, München: 2014.
- [5] RÜSCH, H./SELL, R./RACKWITZ, R.: Statistische Analyse der Betonfestigkeit. In: Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 206. Berlin: Wilhelm Ernst & Sohn Verlag, 1969.
- [6] DEUTSCHER BETON- UND BAUTECHNIK-VEREIN E.V. (DBV): DBV-Merkblatt Modifizierte Teilsicherheitsbeiwerte für Stahlbetonbauteile. Fassung März 2013. Berlin: 2013.
- [7] LOCH, M./STAUDER, F./SCHNELL, J.: Bestimmung der charakteristischen Betonfestigkeiten in Bestandstragwerken. In: Beton- und Stahlbetonbau 106 (2011), Heft 12, Seiten 804 bis 813. Berlin: Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG, 2011.
- [8] KNAB, F./SODEIKAT, CH.: Die Ermittlung der charakteristischen Betondruckfestigkeit von Bauwerken im Bestand – Hinweise aus der Erfahrung sachverständiger Ingenieure. In: Beton- und Stahlbetonbau 110 (2011), Heft 8, Seiten 539 bis 553. Berlin: Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG, 2011.