

Der Bau- sachverständige

Zeitschrift für Bauschäden, Grundstückswert und gutachterliche Tätigkeit



- BAULIT
Bauschäden
- Bauforschung
@ktuell
- Normen @ktuell

online auf
www.derbausv.de

- Fugenabdichtungen bei WU-Bauwerken
- Deckendurchbiegung – Stimmt I/35 immer noch?
- Kondensatschaden bei zu geringer Luftfeuchte
- Das Forderungssicherungsgesetz
- Sicherheiten im Baubereich
- Die Mitarbeiter des Sachverständigen

1 2009



Bundesanzeiger
Verlag

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau



Der Autor:

Prof. Peter Göttlich
Beratender Ingenieur,
Prüfingenieur für
Standsicherheit
Potsdam/Berlin

Stimmt $l/35$ immer noch?

Kritische Anmerkungen und Handlungsalternativen zur Deckenstärke von üblichen Stahlbetonkonstruktionen des üblichen Hochbaus

Architekten und Ingenieure bestimmen die Deckenstärke im Stahlbetonbau i.d.R. mit vereinfachten »Faustformeln«, etwa der klassischen » $h = l/35$ « bzw. » $l^2/150$ «. Die DIN 1045-1, mittlerweile seit 2004 bauaufsichtlich eingeführt und damit bindend, gibt gegenüber älteren Fassungen der Norm die o.g. Kriterien unverändert wieder. Dies ist insofern fraglich, da diese in den 60-er Jahren entwickelt wurden, im Vergleich zu damals aber heute die Baustoffe deutlich mehr ausgenutzt werden. Der Beitrag möchte in einfacher Form die Hintergründe und mögliche planerische Alternativen für Architekten und Ingenieure aufzeigen.

1 Einleitung

Architekten und Ingenieure bestimmen die Deckenstärke im Stahlbetonbau i.d.R. mit vereinfachten »Faustformeln«. Viele erinnern sich vielleicht noch an die Faustformel $h = l/35$, nach der die statische Höhe von Stahlbetondecken ermittelt werden kann. Hintergrund dieser Anmerkungen ist nicht etwa die Sorge um die Tragfähigkeit der Konstruktion, sondern die Sicherstellung eines sinnvollen und dauerhaften Gebrauchszustandes des Tragwerkes. Das bedeutet vor allem:

- a) keine zu große – also in erster Linie keine sichtbare – Durchbiegung ($l/35$)
- b) keine zu große Durchbiegung im Zusammenhang mit rissempfindlichen Bauteilen, die auf oder unter der betreffenden Konstruktion stehen ($l^2/150$).

Insbesondere die zweite Bedingung zieht häufig etwas größere Deckenstärken und damit größere Rohbaukosten nach sich. Alternativ können eine dünnere Decke in Verbindung mit im Ausbau teureren Anschlüssen der nichttragenden Elemente verwendet werden.

Die neue Norm DIN 1045-1, vgl. [1], erstmals seit 2002 bauaufsichtlich eingeführt und damit für alle Tragwerksplaner und Architekten bindend, gibt gegenüber älteren Fassungen der Norm die o.g. Kriterien unverändert wieder. Da diese in den 60-er Jahren auf Basis einer empirischen Untersuchung von Rüsch entwickelt wurden, ist deren Anwendung in der heutigen Zeit fraglich, weil die Baustoffe gegenwärtig vergleichsweise deutlich mehr ausgenutzt werden. Theoretische und praktische Untersuchungen zu den realen Durchbiegungen von Deckenkonstruktionen aus Stahlbeton haben ergeben, dass solche mit den Kriterien nach a) und b) entworfenen Deckenstärken nicht immer ein-

wandfrei gebrauchstauglich sind, sondern zu Schäden führen können.

Der Beitrag möchte in einfacher Form die Hintergründe und mögliche planerische Alternativen für Architekten und Ingenieure aufzeigen, da die genannten Erkenntnisse – auch im Streitfall – bereits als »Stand der Technik« angesehen werden können. Die starre Anwendung der einschlägigen Regeln der gültigen Norm [1] ist in diesem Kontext also nicht sinnvoll.

2 Anforderungen an das Durchbiegungsverhalten von Tragwerken

Unsere Tragwerke müssen in erster Linie standsicher sein, was eine Grundanforderung an die Bruchsicherheit darstellt. Darüber hinaus sollen Tragwerke aber auch dauerhaft und gebrauchstauglich sein. Während ihrer Lebensdauer erwarten wir also, dass zusätzlich zur Standsicherheit ästhetische und funktionale Bedingungen erfüllt werden:

- kein sichtbarer Durchhang
- keine unkontrollierte Rissbildung in nichttragenden, angrenzenden Bauteilen
- dauerhafte funktionierende Entwässerung, Dichtigkeit und Korrosionsschutz.

Hieraus ergibt sich die Notwendigkeit, die Tragwerke ausreichend steif zu gestalten, mit anderen Worten: Die Durchbiegung in bestimmten Grenzen zu halten. Dabei

spielt die Biegeschlankheit, die das Verhältnis der Spannweite zur statischen Höhe beschreibt, eine wichtige Rolle.

Ästhetische Grundanforderung der Gebrauchstauglichkeit:

Die Begrenzung der Biegeschlankheit mit » $l/35$ « soll die Durchbiegung des Tragwerks im Wesentlichen so begrenzen, dass sie dem Nutzer optisch nicht unangenehm – also im Sinne von »Durchhängen« – auffällt oder gar beunruhigt, also ein ästhetischer Gesichtspunkt. Nach allgemeiner Einschätzung hat der Betrachter einer Brücke, eines Balkens oder einer Deckenkonstruktion erst dann den Eindruck des »Durchhängens«, wenn die tatsächliche Durchbiegung etwa größer als Spannweite/250 wird. Eine Decke mit Spannweite 5 m sollte sich also nicht mehr als $500/250 = 2$ cm durchbiegen.

Exponierte Bauwerke wie z.B. Brücken erhalten zusätzlich eine leichte Überhöhung (Stich), da der Betrachter dadurch den Eindruck der Leichtigkeit des Tragwerks erhält. Eine Durchbiegung stellt sich natürlich dennoch ein, der Stich muss lediglich ausreichend groß sein (Abb 1).

Erhöhte Anforderung an die Gebrauchstauglichkeit:

Im Büro- und Geschossbau sind die Anforderungen teilweise deutlich höher, da dort meistens angrenzende, rissempfindliche Bauteile zwischen die Stahlbeton-



Abb. 1: Überhöhung von etwa 10 cm bei einer Spannweite des Überbaus von ca. 24 m, S-Bahn-Brücke, [5]

decken eingebaut werden, z.B. nichttragende Wände oder in zunehmendem Maß auch Glaskonstruktionen. In solchen Fällen müssen die Durchbiegungen also wesentlich strenger begrenzt werden, damit keine unzulässigen Lastumlagerungen von den tragenden auf die nichttragenden Konstruktionselemente stattfinden. Im Falle von Glaskonstruktionen kann eine solche unkontrollierte Umlagerung wegen des spröden Werkstoffverhaltens (schlagartiger Bruch) sogar sehr gefährlich werden (Abb. 2).

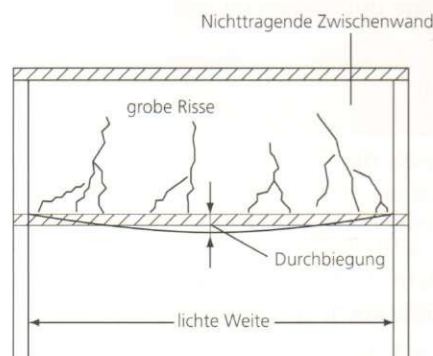


Abb. 2: Schäden infolge zu großer Durchbiegungen, aus [2], sowie verformungsempfindliche Glaslamellen in einem Einkaufszentrum, nachträglich verstärkt durch seitliche U-Profile aus Stahl.

Nach allgemeiner Einschätzung gelten diese erhöhten Anforderungen als erfüllt, wenn die tatsächliche Durchbiegung höchstens gleich der Spannweite/500, also $\leq l/500$ beträgt. Eine Decke mit einer Spannweite von 5 m sollte sich also nicht mehr als $500/500 = 1$ cm durchbiegen. Die früheren Ausgaben der DIN 1045 als auch die aktuelle Fassung der Norm [1] geben hierzu übereinstimmend ein weiteres, einfaches Kriterium zur Bestimmung der Deckenstärke für die beschriebenen erhöhten Anforderungen.

Daraus ergibt sich die statische Höhe formelmäßig mit $\leq l^2/150$ zuzüglich der Betondeckung.

3 Durchbiegung von Stahlbetonbauteilen – Warum ist das so kompliziert?

Grundsätzlich stellt die direkte Berechnung von Durchbiegungen kein besonderes Problem dar. Man könnte also in jedem Einzelfall die Durchbiegung berechnen und den zulässigen Grenzwerten gegenüber stellen. Die Wirklichkeit des Werkstoffes Stahlbeton als Verbundbaustoff ist jedoch komplexer, da ein bewehrtes, biegebeanspruchtes Bauteil planmäßig Risse entwickeln muss, um seine Trageigenschaften entfalten zu können. Die Bewehrung übernimmt die Zugkräfte, weshalb sie sich dehnt und im umgebenden Beton Risse erzwingt (Abb.3).

Risse in Stahlbetontragwerken sind daher – soweit sie klein genug gehalten werden – kein Mangel, sondern sogar notwendig. Leider sind mit der Rissbildung große Steifigkeitsverluste des Tragwerks verbunden, die eine deutliche Zunahme der Durchbiegung bewirken. Zusammenfassend können die besonderen Schwierigkeiten bei der Berechnung der Durchbiegungen von Stahlbetonbauteilen wie folgt beschrieben werden:

- der Steifigkeitsverlust aufgrund teilweise aufgerissenen Querschnitts
- die Betonzugfestigkeit, die zwischen den Rissen versteifend wirkt, ist eine statistisch streuende Materialeigenschaft, d. h. sie ist nur in bestimmten Grenzen bestimmbar
- zeitabhängige Effekte wie Kriechen und Schwinden treten auf, d. h. die Durchbiegungen nehmen über einen Zeitraum von etwa 3 bis 5 Jahren noch zu, ohne das weitere Lasten aufgebracht werden (plastisches Verhalten).

Damit wird ersichtlich, dass Durchbiegungen von Stahlbetontragwerken grundsätz-

lich berechenbar sind, jedoch streuen die Ergebnisse je nach den gewählten Eingangsparametern. Eine »genauere« Berechnung ist also bestenfalls eine gute Schätzung im Sinne von oberen und unteren Grenzwerten der Durchbiegung.

4 Derzeitiger Stand der Technik im Vergleich zur gültigen Norm

Die im Abschnitt 2 beschriebenen Anforderungen und Kriterien zum Entwurf von Deckenkonstruktionen wurden in der Vergangenheit von der Praxis sehr gut angenommen. Die neue Norm DIN 1045-1, vgl. [1], greift das bisherige Entwurfskriterium $\leq l^2/150$ für erhöhte Anforderungen leider unverändert auf, obwohl die Untersuchungen [3], [4] und weitere belegen, dass nicht in allen Fällen Schadensfreiheit gewährleistet ist. Dies gilt insbesondere für Stahlbetondecken mit Spannweiten zwischen 4 m bis 7,5 m, also genau dem Spektrum, das den größten Teil unserer üblichen Hochbauten abbildet. Grundlage der Untersuchung [4] waren genauere Berechnungen der Durchbiegung an einfachen Referenzsystemen (Einfeldträgern) mit variierten

- Spannweiten
- Betongüten
- Bewehrungsgraden
- Belastungsverhältnissen (ständige Last/Verkehrslast).

Als Deckenstärke wurde jeweils nach derzeitig gültiger Norm [1] das Kriterium $\leq l^2/150$ für die erhöhten Anforderungen (Durchbiegung $\leq l/500$ – also für angrenzende Bauteile) verwendet. Die Ermittlung der Durchbiegungen der Referenzsysteme wurde mittels direkter Integration der Krümmung längs des Tragwerks durchgeführt. Berücksichtigt wurden dabei:

- der gerissene und ungerissene Bereich der Platten
- die Mitwirkung des Beton auf Zug zwischen den Rissen

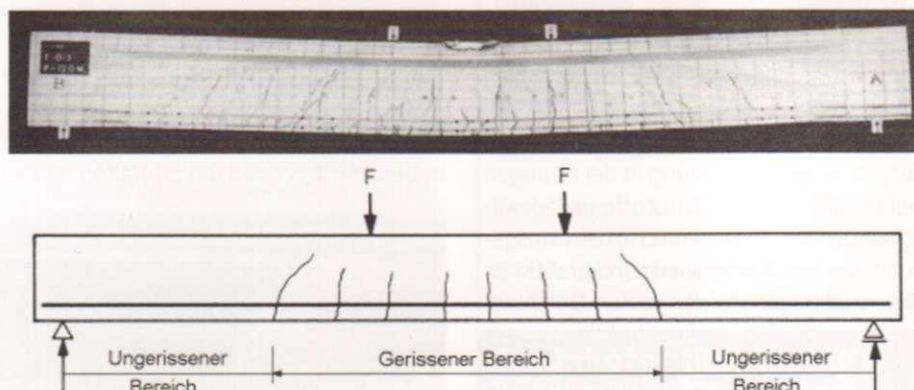


Abb. 3: Gerissener und ungerissener Bereich eines Stahlbetonbalkens, [2]

- die Kriech- und Schwindeigenschaften des Betons.

Für das Kriechen und das Schwinden wurden praxisübliche Bedingungen formuliert, d. h. das Ausschalen der Decken wurde mit etwa einer Woche, die Aufbringung der Ausbaulasten mit etwa einem Monat festgelegt. Bezüglich der langfristigen Nutzungsbedingungen wurden Innenräume mit einer Luftfeuchtigkeit von ca. 50 % unterstellt, was üblichen Wohn- und Bürogebäuden entspricht.

Die Ergebnisse zeigen, dass die erhöhten Anforderungen »I/500« – also bei Einbau verformungsempfindlicher Bauteile – nicht eingehalten sind. Die realistisch ermittelten Durchbiegungen sind überwiegend deutlich größer (Abb. 4).

Man erkennt sehr gut den großen Einfluss der Betongüte auf die Durchbiegung. Diese bestimmt nämlich signifikant die Länge des gerissenen Bereiches im Tragwerk. Die Anforderung »I/500« wird tendenziell erst bei großen Spannweiten eingehalten. In [4] wird auch gezeigt, dass eine Vergrößerung der unteren Bewehrung um z. B. 30 bis 50 % über die Erfordernis der Bruchsicherheit hinaus nur geringfügige Verbesserungen bringt – dies auch nur bei geringwertigen Betongüten wie z. B. der Standardgüte C20/25. Auch konnte festgestellt werden, dass der Einbau einer oberen Druckbewehrung ebenfalls keine bedeutsamen Änderungen bewirkt.

Dass die reale Schadensquote in der Praxis angesichts dieser Ergebnisse dennoch vergleichsweise moderat ausfällt, liegt meist an den Grundannahmen der statischen Berechnungen, die häufig auf der »sicheren Seite« liegen:

- Nebentragwirkungen (Einspannungen, zweiachsiges Tragverhalten) sind nicht berücksichtigt.
- Die Größe der tatsächlich auftretenden Lasten ist oft geringer als veranschlagt.
- Der Zeitpunkt der Lastaufbringung tritt oft wesentlich später als geplant ein (längerer Verfestigungsprozess des Betons, damit geringere Kriechverformungen).
- Die tatsächliche Betonqualität ist besser als die geplante (so genannte Überfestigkeiten).

Zusammenfassend kann also gesagt werden, dass der Haupteinflussparameter die Betongüte ist. Das in der Norm DIN 1045-1 festgeschriebene Kriterium »I₁/150« gilt dagegen vollkommen unabhängig von

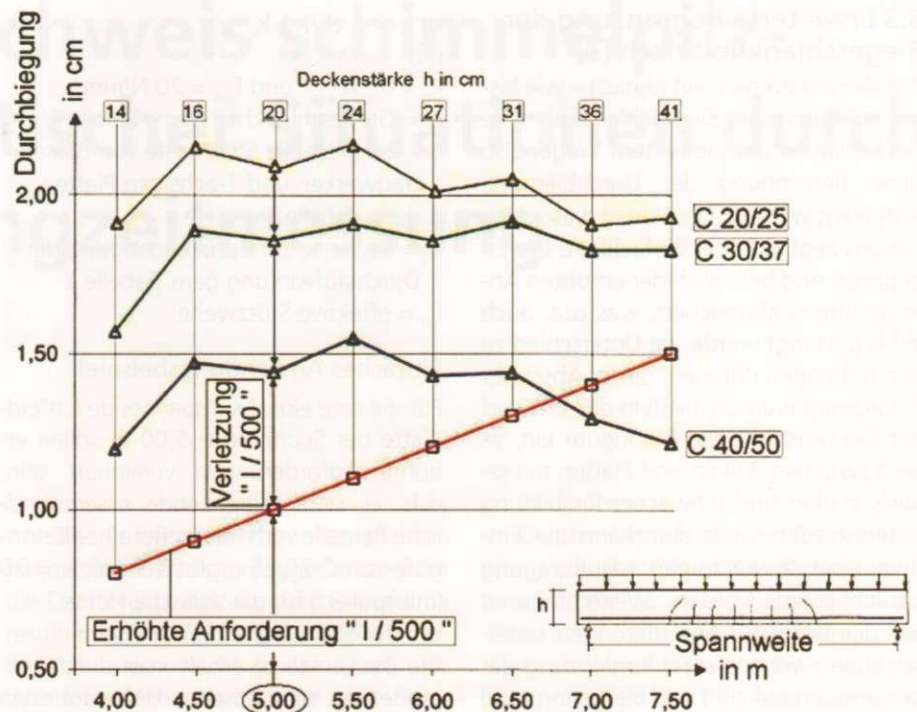


Abb. 4: Tatsächliche Durchbiegungen von Einfeldträgern aus Stahlbeton (C20/25, C30/37, C40/50) und erhöhte Anforderungen, aus [4], nachbearbeitet

der Betongüte und erfüllt damit die notwendige Anforderung »I/500« in vielen praxisüblichen Fällen eher nicht. Planer, also vor allem Architekten und Ingenieure, handeln daher zwar in der Anwendung der Norm grundsätzlich formal richtig, die Rechtsprechung entscheidet jedoch eher nach dem eben beschriebenen Stand der Technik. Dieser wird im Streitfall meist als allgemein bekannt vorausgesetzt.

5 Planerische Handlungsmöglichkeiten

Aufgrund der in Abschnitt 4 dargestellten Ergebnisse empfiehlt es sich für die planerisch tätigen Architekten und Ingenieure, die vereinfachten Kriterien der Biegeschlankheit insbesondere bei erhöhten Anforderungen nicht vorbehaltlos anzuwenden. Nach Meinung des Verfassers bestehen prinzipiell folgende Handlungsmöglichkeiten, um Schäden gezielt vorzubeugen:

5.1 Einbau gleitender Anschlusskonstruktionen

Diese allgemein bekannte Vorgehensweise erlaubt den Entwurf der Deckenstärke mit dem vereinfachten Kriterium »I/35« für geringere Anforderungen, sofern die Bauteile des Ausbaus gewisse Verformungen aufnehmen können, z. B. durch gleitende Deckenanschlüsse. Nachteilig dabei ist, dass die so ausgelegten Bauteile

etwas teurer sind, andererseits steht dem die Kosteneinsparung der deutlich schlankeren Decken des Rohbaus gegenüber. Diese Vorgehensweise ist in jüngerer Zeit häufiger zu beobachten, da sie den Vorteil von einfachen Rechenmodellen in Verbindung mit sehr schnellen und effizienten Ergebnissen bietet.

5.2 Genauere Ermittlung der Durchbiegungen

Wie bereits in den Abschnitten 2 und 3 erläutert, ist die direkte Berechnung von Durchbiegungen deutlich aufwändiger und erfordert v. a. nicht nur eine genaue Kenntnis, sondern eher die Vorgabe bzw. Planung der Abläufe auf der Baustelle: Betonrezepturen, Ausschalzeitpunkte, Art und Dauer der Nachbehandlung des Betons, Zeitpunkte der Lastaufbringung etc. In der Mehrzahl der baupraktischen Fälle sind die genannten Randbedingungen mit großen Unsicherheiten behaftet. Die genauere Ermittlung der Durchbiegungen erscheint daher eher für sehr komplizierte Objekte oder Bauteile sinnvoll. Als Hilfsmittel können die Berechnungen bei einachsig spannenden Tragwerken z. B. in Anlehnung an [4] durchgeführt werden. Im Falle von geometrisch komplizierten und unregelmäßigen Flächentragwerken erweisen sich physikalisch nichtlineare Finite-Element-Programme als hilfreich, die mittlerweile von einigen Herstellern marktreif vertrieben werden, vgl. z. B. [6].

5.3 Erweiterte Begrenzung der Biegeschlankheit nach [3]

Auf diesem Wege kann ähnlich – wie bisher auf Basis einer Biegeschlankheit – die Deckenstärke auf indirektem Wege, also ohne Berechnung der Durchbiegung, festgelegt werden. Der Vorteil dieses Verfahrens liegt in seiner Einfachheit. Die Ergebnisse sind bezüglich der erhöhten Anforderungen abgesichert, was u. a. auch in [4] bestätigt wurde. Im Unterschied zu den bisherigen Kriterien, die im Abschnitt 2 dargelegt wurden, fließt in den Entwurf der Deckenstärke die Betongüte ein, es wird zwischen Balken und Platten mit jeweils starker und schwacher Rissbildung unterschieden, außerdem kann der Einfluss einer zweiachsigen Lastabtragung berücksichtigt werden. Weiterhin wird auf der Seite der Anforderungen unterschieden zwischen einer Begrenzung der Verformung auf $f = l/250$ (gering) und $f = l/500$ (hoch).

Die Werte der Tabelle 1 beruhen auf einer Betonfestigkeitsklasse C 20/25 (Referenzklasse), einer Kriechzahl $\varphi = 2,5$ und einer Verkehrslast der Platten von $q_k \leq 5,0 \text{ kN/m}^2$. Der Einfluss von gegenüber C20/25 abweichenden Betonfestigkeiten wird durch den Beiwert k_c erfasst. Die statische Höhe kann nun festgelegt werden zu:

Tabelle 1: Beiwerte λ_i

zul w		l_i	λ_i
l/250		$\leq 4,0 \text{ m}$	29,0
		7,0 m	23,0 ¹⁾
		12,0 m	19,0
l/500	Platten	$\leq 4,0 \text{ m}$	23,0
		7,0 m	17,0
		12,0 m	13,0
	Balken	$\leq 4,0 \text{ m}$	16,0
		7,0 m	14,0
		12,0 m	13,0

Zwischenwerte können linear interpoliert werden
 1) Bei Balken ist eine Erhöhung des Beiwertes auf $\lambda_i = 22$ möglich

Tabelle 2: Beiwerte α_i (Momentennullpunkte)

Statisches System	α_i
Frei drehbar gelagerter Einfeldträger	1,0
Endfeld eines Durchlaufträgers	0,8
Innenfeld eines Durchlaufträgers	0,7
Kragträger	2,5
Flachdecke - mit der größeren Spannweite	0,85

$\text{erf } d = (l_i/\lambda_i) \cdot k_c$
 mit

$k_c = (f_{ck0}/f_{ck})^{1/6}$ und $f_{ck0} = 20 \text{ N/mm}^2$

λ_i = Grenزشlankheit gem. Tabelle 1

$l_i = \alpha_i \cdot l_{\text{eff}}$: Ideelle Stützweite von Balken-tragwerken und 1-achsigen Platten gem. Tabelle 1

α_i = Beiwerte zur Berücksichtigung der Durchlaufwirkung gem. Tabelle 2

l_{eff} = effektive Stützweite

Einfaches Anwendungsbeispiel

Für die eine einachsige spannende Einfeldplatte der Spannweite 5,00 m sollen erhöhte Anforderungen vereinbart sein, d. h. es sind angrenzende risseempfindliche Bauteile vorhanden. Bei einer Betongüte von C 20/25 ergibt sich mit $\lambda_i = 20$ (interpoliert) für die statische Höhe:

$\text{erf } d = 500/20 \cdot (20/20)^{1/6} = 25 \text{ cm}$

Die Deckenstärke erhält man durch Vergrößerung der statischen Höhe um etwa das Maß der Betondeckung:

$\text{erf } h = 25 \text{ cm} + 3,0 \text{ cm} \approx 28 \text{ cm}$

Bei einer Betongüte von beispielsweise C50/60 reduziert sich die Deckenstärke auf etwa:

$\text{erf } h = 500/20 \cdot (20/50)^{1/6} + 3 \approx 24 \text{ cm}$

(geringfügig abgerundet)

Im Vergleich dazu ergibt sich nach der gültigen Norm [1] unabhängig von der Betongüte:

$\text{erf } h = 5,0^2/150 + 0,03 \approx 20 \text{ cm}$

5.4 Durchbiegungsberechnung mithilfe physikalisch nichtlinearer Programme

Physikalisch nichtlineare Finite-Element-Programme (vgl. z. B. [6]) gewinnen zunehmend an Bedeutung, insbesondere bei komplizierter Geometrie des Tragwerks. Berechnungen mit Hilfsmitteln dieser Art sind naturgemäß aufwändiger und komplexer. Auf iterativem Weg werden die im Tragwerk gerissenen Bereiche festgestellt, um so mit bereichsweise modifizierten Biegesteifigkeiten die Durchbiegung zu berechnen, ggf. auch unter Berücksichtigung der Langzeiteffekte Kriechen und Schwinden. Zuvor muss allerdings eine Bemessung im Grenzzustand der Tragfähigkeit erfolgt sein oder die statisch erforderliche Bewehrung geschätzt werden.

Die Benutzung solcher Hilfsmittel setzt fundierte Kenntnisse der theoretischen Zusammenhänge sowie der FE-Methode voraus. Weiterhin empfiehlt es sich, die Ergebnisse des zu verwendenden Programms zuvor an einfachen Referenzsystemen (z. B. Einfeldplatte) zu testen.

6 Zusammenfassung

Die Regelungen in [1] zur Biegeschlankheit sind in vielen Fällen nicht ausreichend. Insbesondere bei erhöhten Anforderungen an die Durchbiegungen mit angrenzenden, risseempfindlichen Bauteilen, planmäßig niedrigen Betongüten sowie bei statisch bestimmten und ausschließlich einachsig tragenden Bauteilen sind differenziertere Betrachtungen erforderlich, um Schäden sicher auszuschließen. Es wird empfohlen, mögliche und realisierbare Nebentragwirkungen genau zu prüfen und im Zweifelsfall die im Abschnitt 5 dargestellten Möglichkeiten zu verwenden. Insgesamt sollte man sich künftig im Sinne des Bauherrn generell auf etwas großzügigere Deckenstärken einstellen.

Literatur

- [1] DIN 1045-1, Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton, Teil 1: Bemessung und Konstruktion (Ausgabe Juni 2006)
- [2] Leonhardt: Vorlesungen über Massivbau, Teile 1 und 4, Springer Verlag
- [3] Krüger/Mertzsch: Verformungsnachweise - Erweiterte Tafeln zur Begrenzung der Biegeschlankheit, aus Praxishandbuch 2003, Stahlbetonbau aktuell, Bauwerk Verlag GmbH
- [4] Beitrag zur realistischen Ermittlung der Formänderung von Stahlbetontragwerken, Diplomarbeit Thomas Lux, Sept. 2006, Fachhochschule Potsdam, Fachgebiet Massivbau
- [5] Statische Berechnung und Bilder, Archiv P. Göttlich, unveröffentlicht.
- [6] Trimas-Expert, Finite-Elementprogramm RIB, Stuttgart, u. a. geeignet zur Ermittlung der Durchbiegungen im gerissenen Zustand II bei Berücksichtigung von Langzeiteffekten.

Kontakt/Information

Professor Peter Göttlich
 Beratender Ingenieur, Prüflingenieur für Standsicherheit
 Fachhochschule Potsdam
 Pappelallee 8-9
 14469 Potsdam
 GGH-Ingenieure
 Badensche Str. 29
 10715 Berlin