

## Nachrechnung von Brücken – Verfahren der Tragsicherheitsbeurteilung von Betonbrücken im Bestand für Nachweisstufe 4 der Nachrechnungsrichtlinie

FA 15.523

Forschungsstelle: Technische Universität Dortmund, Lehrstuhl für Betonbau (Prof. Dr.-Ing. R. Maurer)

Bearbeiter: Zilch, K. / Maurer, R.

Auftraggeber: Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Bonn

Abschluss: April 2015

### 1 Aufgabenstellung

Eine Bewertung bestehender älterer Spannbetonbrücken auf der Grundlage einer Nachrechnung nach den aktuell maßgebenden Regelwerken DIN-Fachbericht 101 "Einwirkungen auf Brücken" und DIN-Fachbericht 102 "Betonbrücken" ergibt in der Regel erhebliche Defizite insbesondere bei der rechnerischen Tragfähigkeit für Querkraft und Torsion. Eine Überschreitung der berechneten Tragfähigkeiten auf der Grundlage der aktuellen Normen ist allerdings kritisch zu hinterfragen. Die Nachweisverfahren beinhalten an vielen Stellen Idealisierungen und Vereinfachungen, da sie nicht nur zu einer sicheren Bemessung führen, sondern gleichzeitig auch in der Anwendung einfach handhabbar sein sollen. Dadurch sind die vereinfachten Nachweisverfahren in DIN-Fachbericht 102 besonders bei Querkraft und Torsion teilweise sehr konservativ, wie Vergleiche mit Versuchsergebnissen zeigen.

Im Rahmen des FE-Vorhabens sollten Konzepte zur Anwendung wissenschaftlicher Methoden im Rahmen der Nachweisstufe 4 der Nachrechnungsrichtlinie entwickelt und das sich daraus ergebende Potenzial aufgezeigt werden. Durch nichtlineare Berechnungen sollen Tragfähigkeitsreserven aufgezeigt werden, die im Rahmen der üblichen Nachweisführung auf Querschnittsebene, auch mit den modifizierten Verfahren der Stufe 2, nicht berücksichtigt werden können. Von zentraler Bedeutung ist dabei, dass bei allen Nachrechnungen nach Stufe 4 das geforderte Zuverlässigkeitsniveau nach DIN EN 1990 eingehalten wird. Daher muss auch untersucht werden, wie sichergestellt werden kann, dass die erforderliche Sicherheit nicht unterschritten wird. In diesem Zusammenhang werden die Unsicherheiten aus den streuenden Basisvariablen durch Parameterstudien beziehungsweise Sensitivitätsanalysen untersucht, um daran aufbauend ein geeignetes Sicherheitskonzept zu entwickeln.

Ziel der Untersuchungen sind Aussagen über Potenziale aber auch Anwendungsgrenzen der nichtlinearen FEM im Rahmen von Nachrechnungen nach der Nachweisstufe 4.

Da die meisten Defizite bestehender Brücken im Bereich der Querkrafttragfähigkeit auftreten, liegt hierauf der Schwerpunkt des Forschungsvorhabens.

### 2 Untersuchungsmethodik

#### 2.1 Allgemeines Vorgehen

Zunächst wurden die Grundlagen wissenschaftlicher Methoden für die Nachrechnung bestehender (Spann-)Betonbrücken dargestellt. Dabei ist eine erfolversprechende Methode mit großem Potenzial die Anwendung der nichtlinearen Finite-Elemente-Methode mit einem angepassten Sicherheitskonzept.

Bei der Verwendung der nichtlinearen FEM wurde bei der Modellierung des Werkstoffs Beton beziehungsweise Stahlbeton besonderes Augenmerk auf die Materialmodelle gelegt, da der Werkstoff Beton sich durch ein sehr komplexes Materialverhalten auszeichnet. Bei querkraftbeanspruchten Bauteilen spielt insbesondere das Rissverhalten eine entscheidende Rolle. Im Rahmen der Modellierung können Risse diskret oder verschmiert abgebildet werden.

Zunächst wurden daher die unterschiedlichen Materialmodelle für Beton und die Möglichkeiten der Modellierung des Werkstoffs Stahl- beziehungsweise Spannbeton dargestellt. Außerdem wurde auf wesentliche Grundlagen der nichtlinearen FEM eingegangen.

Um einen Überblick über Möglichkeiten und Grenzen verschiedener Programme zu verschaffen, wurden vier Programme ausgewählt und vorgestellt. Die Anwendung verschiedener Programmsysteme diente als Grundlage zur Abschätzung der Modellunsicherheiten.

Anschließend wurden mit nichtlinearen Verfahren auf der Grundlage unterschiedlicher Modellierungen und Programmsysteme Versuche von Bauteilen aus Stahlbeton und Spannbeton nachgerechnet. Dabei wurden die Materialparameter und Festigkeiten zunächst mit ihren Mittelwerten berücksichtigt. Im Rahmen einer Parameterstudie wurden anschließend die Auswirkungen der Streuungen der Einflussparameter untersucht. Von Bedeutung hat sich dabei die Größe der ansetzbaren Betonzugfestigkeit herausgestellt.

Basierend auf probabilistischen Verfahren erfolgten Untersuchungen zur Gewährleistung des in den aktuellen Normen geforderten Zuverlässigkeitsniveaus.

Die Auswertung bereits durchgeführter Nachrechnungen nach Stufe 4 war nicht Bestandteil dieses FE-Vorhabens. Im Rahmen der Untersuchungen wurde nicht von durch Korrosion oder Alterung geschädigten Tragwerken ausgegangen.

Es wurden keine Untersuchungen zu möglichen Modifikationen der Einwirkungen durchgeführt.

#### 2.2 Verwendete nichtlineare Finite-Elemente-Programme

Für die numerischen Simulationen stehen heute sehr leistungsfähige Programmsysteme zur Verfügung. Eingesetzt wurden die wissenschaftlichen FE-Programme ABAQUS und ATENA sowie die kommerziellen Programme SOFiSTiK und InfoCAD (Fa. Infograph). Letztere verfügen für die Belange der Praxis

über einen vergleichsweise sehr hohen Standard mit Elementen zur Modellierung des nichtlinearen Werkstoffverhaltens von Stahlbeton. Während ABAQUS und ATENA vorwiegend für wissenschaftliche Untersuchungen an Technischen Universitäten eingesetzt werden, sind SOFiSTiK und InfoCAD als kommerzielle Programmsysteme auch unter den einschlägigen Ingenieurbüros weit verbreitet und finden bei der Nachrechnung bestehender Bauwerke häufig Anwendung.

In allen Programmen sind verschmierte Rissmodelle implementiert, das heißt, bei "gerissenen" Elementen wird in unterschiedlicher Art die Steifigkeit vermindert. Bei den Programmen ABAQUS und ATENA ist eine dreidimensionale Modellierung mit Kontinuumelementen für den Beton möglich. Bei SOFiSTiK und InfoCAD erfolgt die Modellierung zweidimensional mit Schalenelementen. Die Bewehrung wurde verschmiert (SOFiSTiK) oder als diskrete Stäbe (ABAQUS, InfoCAD und ATENA) eingegeben. Bis auf das Programm InfoCAD können bei allen Programmen die Materialparameter manuell angegeben werden. Bei InfoCAD stehen für die Betonfestigkeit nur die Festigkeitsklassen nach DIN EN 1992-1-1 beziehungsweise -2 zur Verfügung.

### 3 Untersuchungsergebnisse

#### 3.1 Versuchsnachrechnungen

Die Nachrechnungen erfolgten mit allen Programmen mit den im Versuch gemessenen Werten der Materialparameter. Diese Werte wurden als Mittelwerte der Materialparameter gedeutet. Ziel war die Überprüfung, inwieweit die Nachrechnung mit den tatsächlichen Versuchsergebnissen übereinstimmt. Neben den Last-Verformungs-Kurven wurden auch die Rissbilder sowie die Bügelspannungen verglichen, sofern vorhanden.

##### 3.1.1 Versuchsnachrechnungen an Stahlbetonträgern

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden fünf Stahlbetonbalken mit unterschiedlichen Versagensmechanismen mit den vorgestellten Programmen nachgerechnet.

Dabei handelt es sich um die Versuche 10, E4, E6 und ET3 aus der Versuchsreihe von Leonhardt zu "Schubversuchen an einfeldrigen Stahlbetonbalken mit und ohne Schubbewehrung" aus dem Jahr 1962 sowie den Versuch BM 100 aus dem Jahr 1998, der am Mark Huggins Structural Laboratory der Universität Toronto, Kanada, durchgeführt wurde.

Die Versagensmechanismen umfassen Biege- und Schubversagen von Balken mit und ohne Schubbewehrung.

##### 3.1.2 Versuchsnachrechnung an Spannbetonträgern

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden vier Spannbetonbalken mit unterschiedlichen Versagensmechanismen mit den vorgestellten Programmen nachgerechnet.

Dabei handelt es sich um zwei vorgespannte Einfeldträger von Leonhardt zu "Schubversuchen an Spannbetonträgern" aus dem Jahr 1973 sowie von Cafilich & Thürlimann zu "Biegeversuchen an teilweise vorgespannten Betonbalken" aus dem Jahr 1970. Außerdem wurden aus aktuelleren Forschungsvorhaben

der BASt zwei vorgespannte Durchlaufträger nachgerechnet. Hierbei handelt es sich um den VT1 von Hegger & Herbrand aus dem Forschungsvorhaben FE 15.0498/2010/FRB und den DLT1 von Maurer et al. aus dem Forschungsvorhaben FE 89.0264/2011.

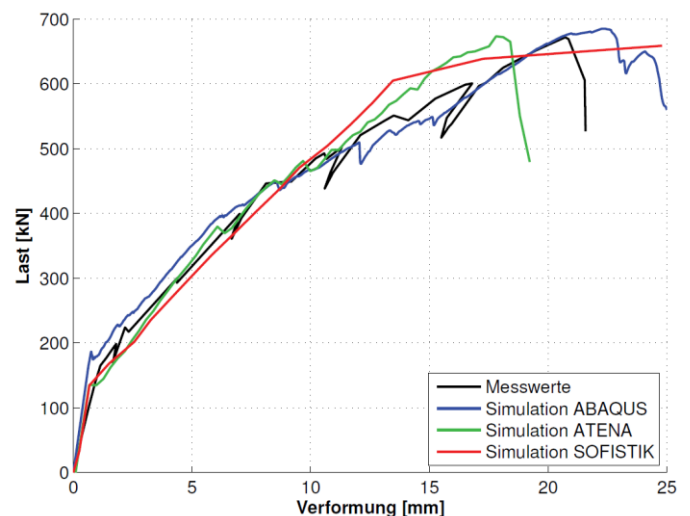
Die Versagensmechanismen umfassen Biege- und Schubversagen von Balken mit Schubbewehrung.

#### 3.1.3 Ergebnisse der Nachrechnungen

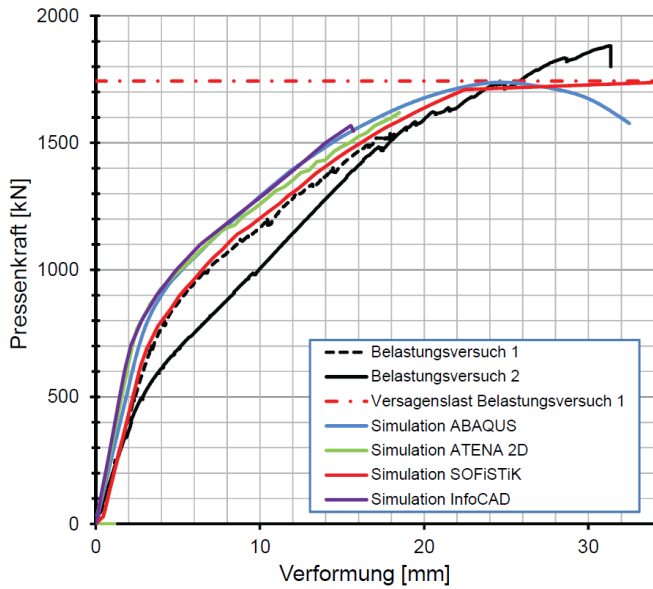
Die Versuche konnten mit allen Programmen mit unterschiedlichem Modellierungsaufwand nachgerechnet werden. Die Übereinstimmung mit den Versuchsergebnissen variierte von Programm zu Programm, wobei die Über- beziehungsweise Unterschreitungen der Traglasten nicht mehr als +8 % beziehungsweise in einem ungünstigen Einzelfall -37 % betragen. Zum Teil war eine Kalibrierung von Modell- und/oder Materialparametern erforderlich, wie zum Beispiel die Wahl des Dilatanzwinkels und des Viskositätsparameters bei ABAQUS. Außerdem zeigte sich insbesondere bei ABAQUS eine große Abhängigkeit der Ergebnisse von der Wahl der Zugfestigkeit. Die größten Abweichungen von 30-37 % bezogen auf die Versuchstraglast sind vermutlich auf Schwächen in den Materialmodellen zurückzuführen.

Beispielhaft sind im Folgenden die Lastverformungskurven für den Stahlbetonträger BM 100 (bügelbewehrt mit Schubversagen) sowie für den zweifeldrigen Spannbetonträger DLT1 dargestellt (Bild 1 und Bild 2).

Für die im Rahmen des Forschungsprojekts nachgerechneten Versuche ergibt sich ein "Modellanpassungsparameter" von  $\gamma_{mod}^* = 1,108$ . Wenn eine berechnete Tragfähigkeit durch diesen Wert (1,1082) dividiert wird, bedeutet das aus statistischer Sicht, dass der sich ergebende Wert in 95 % der Fälle die reale Tragfähigkeit des Versuchsträgers nicht überschätzt. Die bei dieser Auswertung verwendeten Werte wurden jedoch nur anhand der im Rahmen dieses Forschungsvorhabens durchgeführten Versuchsnachrechnungen bestimmt und sind auf andere Versuchsnachrechnungen nicht ohne Weiteres übertragbar.



**Bild 1: BM 100: Gegenüberstellung der mittels unterschiedlicher Programmsysteme gewonnenen Last-Verformungs-Kurven**



**Bild 2: DLT1: Gegenüberstellung der mittels unterschiedlicher Programmsysteme gewonnenen Last-Verformungs-Kurven**

Tabelle 1 zeigt die Ergebnisse für die Systemtraglasten der Nachrechnungen mit den einzelnen Programmen.

### 3.2 Sicherheitskonzept

#### 3.2.1 Berechnungen mit streuenden Materialparametern

Die Berechnungen mit streuenden Materialparametern werden mit dem Programm SARA durchgeführt. Das Programm SARA stellt die Verknüpfung zwischen dem nichtlinearen Finite-Elemente-Programm ATENA und der Probabilistiksoftware Freet her. Diese Verknüpfung ermöglicht wiederholte Berechnungen eines Finite-Elemente-Modells mit zufälligen Werten der Materialparameter, die durch den Mittelwert, den Variationskoeffizienten und die Verteilungsfunktion (Normal- und Log-Normal-Verteilung) vollständig definiert sind. Aus den Verteilungen der Materialparameter und deren Korrelation untereinander generiert Freet mehrere Sätze an Eingangswerten für die nichtlinearen Finite-Elemente-Berechnungen mit ATENA (Monte Carlo-Simulation). Als Ergebnis der SARA-Berechnungen können die Histogramme der erreichten Bruchlasten oder der maximalen Verformungen oder die Last-Verformungs-Kurven ausgegeben werden.

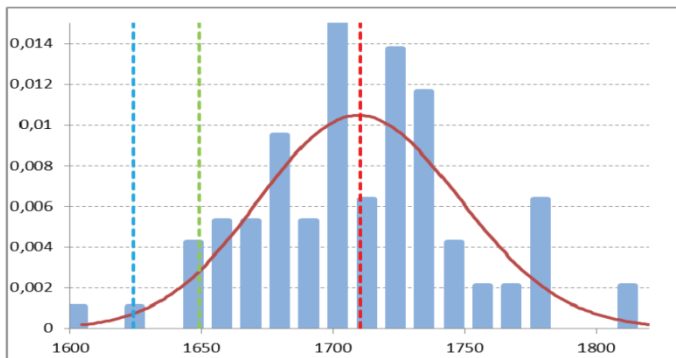
**Tabelle 1: Vergleich der Traglasten aus den numerischen Simulationen mit den Versuchswerten**

Versuch	Versuchstraglast je Presse [kN]	Rechnerische Traglasten beziehungsweise Querkraft [kN]				
		ABAQUS	ATENA		SOFiSTiK	InfoCAD
			2-D	3-D		
Balken 10	94,2	87 (-9 %)	94 (-2 %)	-	83 (-14 %)	70 (-27 %)
Balken E4	365	311 (-17 %)*	320 (-14 %)	-	329 (-12 %)	258 (-30 %)
Balken E6	182,5	200 (+8 %)	151 (-19 %)	-	195 (+5 %)	180 (-3 %)
Balken BM100	672	692 (+3 %)	674 (0 %)	-	672 (0 %)	-
Balken ET3	235,4	150 (-37 %)**	245 (+2 %)	-	240 (0 %)	-
Balken B4	251	180 (-28 %)	243 (-3 %)	-	268 (+7 %)	238 (-5 %)
Balken TP3	1 831	1 690 (-8 %)	1 704 (-7 %)	1 830 (0 %)	1 620 (-12 %)	-
Balken DLT1	1 743	1 737 (0 %)	1 619 (-7 %)	1 629 (-7 %)	1 740 (0 %)	1 568 (-10 %)
Balken VT1	421	400 (-5 %)	417 (-1 %)	-	385 (-8 %)	-

\* mit angepasster Zugfestigkeit Traglast bei 332 kN = 11 %

\*\* mit angepasster Zugfestigkeit Traglast bei 226 kN (-6 %)

Für das Histogramm der Bruchlasten wird von Freet auch eine Verteilungsfunktion mit den zugehörigen Parametern wie Mittelwert, Standardabweichung und Variationskoeffizient vorgeschlagen. Die Ergebnisse aus der SARA-Berechnung werden anschließend in das Tabellenkalkulationsprogramm MS-Excel exportiert und ausgewertet.



**Bild 3: Histogramm und Verteilungsdichte für die Bruchlasten**

### 3.3 Gegenüberstellung vorhandener Sicherheitskonzepte für Nichtlineare Finite-Elemente-Berechnungen

Im Rahmen dieses Forschungsprojekts wurden die drei folgenden vereinfachten Sicherheitskonzepte für nichtlineare Finite-Elemente-Berechnungen auf ihre Eignung untersucht und auf ausgewählten Versuchsbalken angewendet sowie der genaueren Berechnung mit streuenden Materialparametern gegenübergestellt:

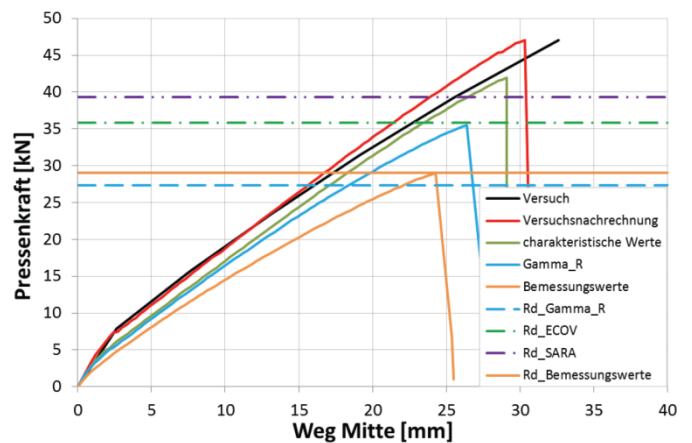
- "Global resistance factor method"/  $\gamma_R$ -Verfahren (ModelCode 2010/DIN EN 1992 mit NA)
- "Estimated coefficient of variation", ECOV-Methode (ModelCode 2010)
- "Partial factor method" (ModelCode 2010)

Die Anwendung der unterschiedlichen Sicherheitskonzepte erfordert Berechnungen mit unterschiedlichen Materialparametern. Die für die Auswertung der Sicherheitskonzepte erforderlichen Berechnungen wurden parallel mit den vier im Projekt verwendeten Programmen durchgeführt.

Im Folgenden werden beispielhaft die Ergebnisse des Versuchsbalkens 10 von Leonhardt & Walther (1962) dargestellt. Bei dem Versuchsträger handelt es sich um einen einfeldrigen Stahlbetonträger mit rechteckigem Querschnitt ohne Bügelbewehrung mit Biegeversagen. Die Materialparameter wurden in den Finite-Elemente-Berechnungen entsprechend der Vorgaben der einzelnen Sicherheitskonzepte angesetzt. Bei der Anwendung auf Schubprobleme müssen diese Sicherheitskonzepte um den Ansatz der Betonzugfestigkeit erweitert werden. Die Last-Verformungs-Kurven der durchgeführten Berechnungen sowie die ermittelten Bemessungswiderstände sind im Bild 4 zusammengefasst.

Bei der Berechnung mit streuenden Materialparametern und bei der ECOV-Methode wurde ein Teilsicherheitsbeiwert zur Berücksichtigung der Modellunsicherheit von 1,06 (gemäß ModelCode 2010) berücksichtigt, während bei den anderen beiden Methoden eine Modellunsicherheit von ca. 1,1 bereits im Verfahren enthalten ist. Zur Ermittlung der Modellunsicherheit bei

nichtlinearen Finite-Elemente-Berechnungen sind weitere Untersuchungen erforderlich.



**Bild 4: Gegenüberstellung Last-Verformungs-Kurven und Bemessungswiderstände der unterschiedlichen Sicherheitskonzepte (Balken 10)**

## 4 Fazit

### 4.1 Nichtlineare Finite-Elemente-Berechnungen

Die Versuchsrechnungen haben gezeigt, dass die nichtlinearen Analysen auf Mittelwertniveau das tatsächliche Bauteiltragverhalten mit einem Variationskoeffizienten von 11,8 % wiedergeben. Bei der weiteren Auswertung wurde aber deutlich, dass sowohl auf Mittelwertniveau (Versuchsrechnung) wie auch bei Anwendung der verschiedenen Sicherheitskonzepte teilweise systematische Abweichungen zwischen den Ergebnissen der verschiedenen Programme auftreten. So konnte beobachtet werden, dass zum Beispiel die Berechnungen mit SOFiSTiK in der Tendenz etwas höhere Tragfähigkeiten als die anderen Programme lieferten. Daraus folgt, dass bei den Rechenergebnissen systematische Einflüsse in Abhängigkeit des gewählten Programms und den darin implementierten Materialmodellen auftreten können. Jedoch wurden bei größeren Abweichungen die Tragfähigkeiten auf der sicheren Seite liegend immer unterschätzt. Die Ursache für die Abweichungen der Ergebnisse zwischen den Programmen liegt neben Unterschieden in der Modellierung hauptsächlich im jeweils verwendeten Materialmodell. Hier ist zum Teil eine große Sensitivität der Berechnungsergebnisse auf die Zugfestigkeit zu erkennen, was nicht immer physikalisch begründbar ist.

### 4.2 Sicherheitsüberlegungen

Alle vereinfachten Verfahren zur Ermittlung des Bemessungswerts der Tragfähigkeit liefern im Vergleich zu der genaueren Berechnung mit streuenden Materialparametern (SARA) auf der sicheren Seite liegende Ergebnisse. Die "Global resistance factor method" und die "Partial factor method" führen zu vergleichbaren Ergebnissen. Diese Ergebnisse liegen allerdings sehr auf der sicheren Seite, sodass in manchen Fällen das Potenzial der Nichtlinearen Finite-Elemente-Methoden nicht voll ausgenutzt wird. Die ECOV-Methode liefert die am nächsten an der SARA-Berechnung liegenden Ergebnisse. Der Rechenaufwand für die ECOV-Methode ist allerdings doppelt so hoch wie für die anderen vereinfachten Verfahren, weil sie zwei getrennte

Berechnungen erfordert (Berechnung mit Mittelwerten und mit charakteristischen Werten). Die Berechnungen, die durch ihre statistischen Verteilungen beschrieben werden (Berechnung mit dem Programm SARA), liefern die genauesten Ergebnisse, sind aber sehr aufwendig und für eine Anwendung in der Praxis eher ungeeignet.

### 5 Folgerungen für die Praxis

Das grundsätzliche Potenzial der numerischen Simulation auf Grundlage der nichtlinearen FEM konnte überzeugend dargestellt werden. Allerdings müssen die Rechenmodelle durch Nachrechnung geeigneter repräsentativer Versuche kalibriert und validiert werden. Dies umfasst Kleinteilversuche wie die Scheibenversuche von Kupfer ebenso wie die Nachrechnung gut dokumentierter Versuche. Die Anwendung nichtlinearer numerischer FEM-Verfahren setzt eine umfassende Einarbeitung in die Thematik und Erfahrung in der Interpretation der Ergebnisse voraus.

Es ist davon auszugehen, dass Berechnungen mit dem Teilsicherheitskonzept und dem  $\gamma_R$ -Verfahren auf der sicheren Seite liegende Traglasten liefert. Die Forschungsergebnisse legen nahe, dass der im ECOV-Verfahren vorgesehene Modellunsicherheitsbeiwert  $\gamma_{mod} = 1,06$  zu gering angesetzt ist.

In der Literatur sind unterschiedliche Teilsicherheitsbeiwerte zur Berücksichtigung der Modellunsicherheit zu finden. Um eine zutreffende Modellunsicherheit für nichtlineare Finite-Elemente-Berechnungen zu bestimmen sind noch weitergehende Untersuchungen notwendig.

### 6 Literatur

- Leonhardt, F. & Walther, R. (1962): Schubversuche an einfeldrigen Stahlbetonbalken mit und ohne Schubbewehrung. DAFStb Heft 151.
- Leonhardt, F., Koch, R. & Rostasy, F. S. (1973): Schubversuche an Spannbetonträgern. DAFStb Heft 227.
- DIN EN 1992-1-1: Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau; Januar 2011
- CEB-FIB (1991): ModelCode 1990 – Bulletin d'information. Lausanne: Comité Euro-International du Béton (CEB)
- Kupfer, H. (1973): Das Verhalten des Betons unter mehrachsiger Kurzzeitbelastung unter besonderer Berücksichtigung der zweiachsigen Beanspruchung. DAFStb Heft 229