

# Robustheit von Stahlbetonstützen

## Robustness of reinforced concrete columns

Empelmann, M.; Matz, H.

### Abstract

In a robust engineering structure, the damage caused by unplanned loads must be limited to a reasonable extent in order to avoid abrupt failure or progressive collapse. To achieve a robust structure, the key structural members must be considered in detail. While an abrupt tensile failure of components subjected to bending loads is prevented by the minimum bending reinforcement, a robust failure of reinforced concrete columns cannot be guaranteed by the current design requirements in all cases. To shed light on this problem, a validated rheological model is used at iBMB, Division of Concrete Construction to investigate the robustness of reinforced concrete columns.

### 1. Einleitung

Die steigende Bedeutung der Ressourcenschonung im Bauwesen führt zu neuen Entwicklungen, zu denen das leichte und materialsparende Bauen zählt. Für Stützen bedeutet das eine schlanke und materialoptimierte Konstruktion, für die eine Betrachtung der Robustheit notwendig wird. Der Eurocode 1 (EC1) definiert Robustheit als die „Eigenschaft eines Tragwerks, außergewöhnliche Einwirkungen so zu überstehen, dass keine Schäden entstehen, die in keinem Verhältnis zur Schadensursache stehen“ /1/. Grundsätzlich sollte ein robustes Stahlbetonbauteil nach dem Erreichen der Traglast also noch eine Resttragfähigkeit aufweisen, die z. B. die Einleitung von evakuierenden Maßnahmen ermöglicht. Ein schlagartiges Versagen wird nach Eurocode 2 (EC2) /2/ bei biegebeanspruchten Bauteilen durch den Nachweis der Mindestbewehrung zur Sicherstellung eines duktilen Bauteilverhaltens (Robustheitsbewehrung) verhindert. Durch die sichtbare Rissbildung sowie eine große Durchbiegung kann von einer Versagensvorankündigung ausgegangen werden (Bild 1, links). Ein robustes Bauteilverhalten bei druckbeanspruchten Traggliedern kann jedoch trotz Einhaltung der Regeln zur konstruktiven Durchbildung nach EC2 (Mindestlängsbewehrung, Bügelabstände etc.) nicht in allen Fällen sichergestellt werden. Besonders bei Verwendung hoch- (HPC) und ultrahochfester Betone (UHPC) muss daher über eine Anpassung bzw. Erweiterung der Konstruktionsregeln für Druckglieder diskutiert werden. Bild 1 (rechts) zeigt ein sprödes

und damit nicht robustes Versagen einer Stahlbetonstütze, bei der die aufnehmbare Last nach Erreichen der Traglast  $F_u$  schlagartig abfällt. In Kombination mit einer nicht ausreichenden Resttragfähigkeit  $F_r$  kann es dann zu einer Kettenreaktion im Gesamttragwerk, einem sogenannten progressiven Kollaps kommen.

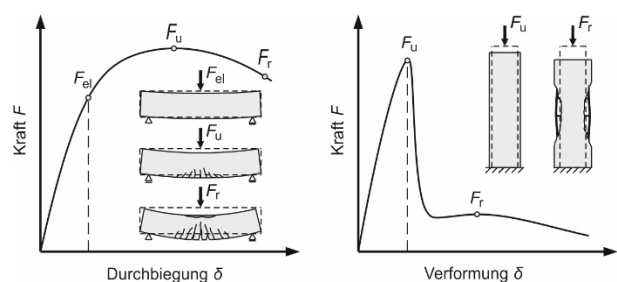


Bild 1: Last-Verformungsverhalten eines robusten Biegebalkens und einer nicht robusten Stütze

### 2. Bewertung der Robustheit von Stahlbetonstützen

In der Fachliteratur existieren eine Reihe von Ansätzen zur qualitativen Abschätzung des Nachbruchverhaltens. Ein quantitativer Ansatz zur Bewertung der Robustheit von Stützen wurde am Fachgebiet Massivbau entwickelt /3/. Die Robustheit wird hier über den  $\beta_{1,33}$ -Faktor, dem Quotienten von  $F(w/w_u = 1,33)$  und  $F_u$ , definiert. Dabei beschreibt  $F_u$  die Traglast der Stütze und  $F(w/w_u = 1,33)$  die Last bei der Längsverformung  $\Delta l_z/\Delta l_{z,max} = 1,33$ . Weist eine Stütze einen Faktor von  $\beta_{1,33} \geq 0,5$  auf, gilt diese als robust. Darunter befindliche Werte werden als nicht robust bewertet. Der Zusammenhang ist in Bild 2 qualitativ dargestellt.

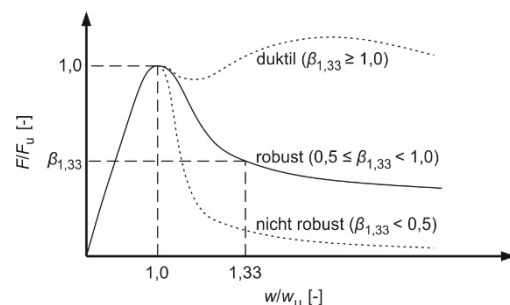


Bild 2: Ansatz zur Bewertung der Robustheit nach /3/

### 3. Rheologisches Modell

Um das Nachbruchverhalten von Stahlbetonstützen ohne aufwendige numerische und experimentelle Untersuchungen bestimmen zu können, wurde ein rheologisches Modell entwickelt. Dieses berücksichtigt die drei charakteristischen Traganteile von Stahlbetonstützen: die in Stützenlängsrichtung belastete, nicht umschnürte Betondeckung, der mehraxial belastete, umschnürte Betonkern und die Stützenlängsbewehrung. Die Anteile werden über parallel geschaltete Federn mit entsprechenden Kraft-Dehnungs-Beziehungen abgebildet (Bild 3).

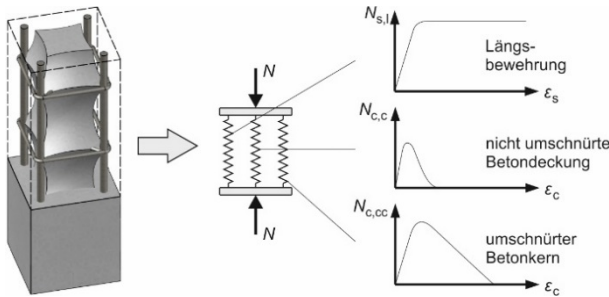


Bild 3: Rheologisches Modell für Stahlbetonstützen

Die rechnerische Beschreibung der jeweiligen Traganteile sowie die Validierung des Modells mithilfe von am Fachgebiet Massivbau durchgeführten Stützenversuchen können /4/ entnommen werden.

### 4. Theoretische Untersuchungen

Um die maßgebenden Einflüsse auf die Robustheit von Stahlbetonstützen zu untersuchen, wurden mithilfe des rheologischen Modells weiterführende Parameterstudien durchgeführt. Bild 4 zeigt exemplarisch das Verhältnis Bügelabstand  $s_w$  zu Längsbewehrungsdurchmesser  $\phi_1$ , welches für verschiedene Betondruckfestigkeiten  $f_{ck}$  sowie Bügelanordnungen (Typ A, B und C) zu einem robusten Bauteilverhalten mit  $\beta_{1,33} = 0,5$  führt /4/.

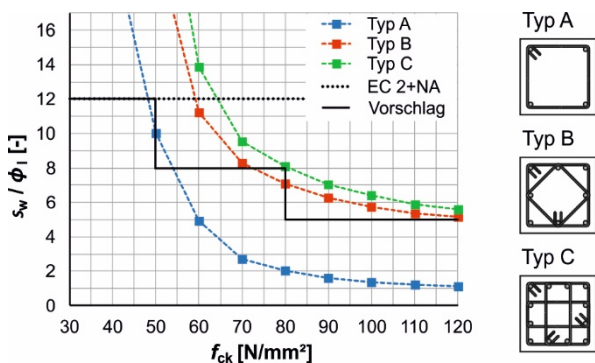


Bild 4: Erforderlicher Bügelabstand für robuste Stützen mit  $\beta_{1,33} = 0,5$  nach /4/

### 5. Zusammenfassung und Ausblick

Die Variation der maßgebenden Parameter zur konstruktiven Durchbildung von Stahlbetonstützen zeigen erste Hinweise zur gezielten Steuerung der Robustheit von rechteckigen Stahlbetonstützen. Auf diese Weise wird sehr deutlich, dass eine Anpassung und Erweiterung der konstruktiven Regeln für Stützen nach EC 2 insbesondere bei Verwendung von hochfestem Beton erforderlich ist, wenn ein robustes Bauteilverhalten gewünscht und sichergestellt werden soll. Anpassungen werden bei der Mindestlängsbewehrung  $A_{s,min}$ , der Mindestanzahl der Längsstäbe und dem maximalen Abstand zwischen rückverankerten Längsstäben empfohlen. Ein erster Ansatz für die maximalen Abstände der Querbewehrung  $s_{cl,max}$  ist im Bild 4 dargestellt. Bei hochfesten Betonen sollte dabei mindestens Typ B mit acht rückverankerten Längsstäben verwendet werden.

Weiterführende Untersuchungen zur gezielten und quantifizierbaren Auslegung des Nachbruchverhaltens von gedrunenen sowie schlanken Stützen laufen derzeit am iBMB, Fachgebiet Massivbau der TU Braunschweig. Dazu werden neben weiteren modelltheoretischen Studien auch Auswertungen mit einer eigenen umfangreichen Datenbank zu Stützenversuchen sowie numerische Untersuchungen hinzugezogen.

### 6. Literatur

- /1/ DIN EN 1992-1-7: Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke, 2010.
- /2/ DIN EN 1992-1-1: Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken, 2011.
- /3/ Empelmann, M.; Oettel, V.: Weiterentwicklung von Bemessungs- und Konstruktionsregeln bei großen Stabdurchmessern ( $>\phi 32$  mm, B500) – Tragverhalten von Druckgliedern. Schlussbericht zum AiF-Forschungsvorhaben 16992 N, 2015.
- /4/ Empelmann, M.; Matz, H.: Robustheit von Stahlbetonstützen. In: Beton- und Stahlbetonbau 114 (2019), Heft 11, S. 837-846.
- /5/ Empelmann, M.; Matz, H.: Robustness of reinforced concrete columns. Proceedings of fib Congress 2020 in Shanghai (China) (in press).
- /6/ Steven, G.; Empelmann, M.: Gedrungene Stützen aus UHPFRC mit hochfester Längsbewehrung. In: Beton- und Stahlbetonbau 109 (2014), Heft 5, S. 344-354.