

Zuverlässigkeit hochbeanspruchter Druckglieder aus UHPC

Der Einsatz ultrahochfester Betone erlaubt eine Erweiterung des Anwendungsbereichs bisher üblicher und bewährter Massivbaukonstruktionen. Da das Tragverhalten eines Bauteiles über seinen Lebenszyklus mit entsprechenden Unsicherheiten bzgl. der Einwirkungen sowie der Material- und Systemeigenschaften behaftet ist, stellte sich die Frage, bis zu welchen Anwendungsgrenzen schlanke UHPC-Druckglieder die Anforderungen an die erforderliche Tragwerkszuverlässigkeit noch erfüllen. Vor dem Hintergrund dieses Sachverhaltes ermöglichte die Deutsche Forschungsgemeinschaft die Förderung der Untersuchung der Zuverlässigkeit schlanker Stützen aus UHPC. Dieser Beitrag berichtet über die Forschungstätigkeit im Rahmen des Projektes und stellt wesentliche Ergebnisse der Zuverlässigkeitsanalysen vor.

1 Überblick

Seit Beginn des institutionell geplanten Siedlungsbaus unterliegen Bauwerke unterschiedlichen Anforderungen, die sich im Laufe der Zeit nicht wesentlich geändert, jedoch in der Gewichtung ihrer Wahrnehmung verschoben haben. Bauwerke sollen demnach zweckmäßig (Funktionalität), sicher (Zuverlässigkeit), wirtschaftlich (Ökonomie), stilvoll (Ästhetik) und seit der Neuzeit auch ressourcenschonend (Ökologie) sein. Im Sinne eines nachhaltigen Umgangs mit Umwelt und Natur ist in den vergangenen Jahren der Aspekt ressourcenschonender Technologieentwicklungen zunehmend auch in den Fokus der Bauindustrie gerückt. Speziell in dem zurückliegenden Jahrzehnt ist dabei ein Trend zur Entwicklung nachhaltig effizienter Betonwerkstoffe festzustellen. Diese betontechnologischen Entwicklungen erlauben mittlerweile eine zielsichere Herstellung ultrahochfester Betone (**Ultra-High Performed Concrete**) mit Druckfestigkeiten von über 150 N/mm².

Insbesondere bei hoch beanspruchten Druckgliedern, wie z. B. bei Stützen in Hoch- und Industriebauwerken, könnten durch die höhere Druckfestigkeit dieses Hochleistungsbaustoffs die im Massivbau bisher üblichen Grenzhöhen deutlich gesteigert bzw. die zur Lastabtragung erforderlichen Querschnittsabmessungen reduziert und damit ein wertvoller Beitrag zum ressourcenschonenden Einsatz des Werkstoffes Beton beigetragen werden. Diese positive Entwicklung führt in vielen Fällen zu sehr schlanken und damit stabilitätsgefährdeten Tragsystemen, die äußerst sensiv auf die nicht vermeidbaren Streuungen der Material- und Bauteileigenschaften reagieren.

Reliability of highly stressed UHPC-columns

Meanwhile concrete-technological developments allow the production of UHPC with a compressive strength of more than 150 N/mm². Thus, the cross-sectional dimensions required for highly stressed compression members can be reduced. However, in many cases this positive development increased the trend to even more slender and therefore likelier to buckle structural systems. Hence, it is to be expected that under certain conditions the safety level of such construction elements decreases. Because of this, the reliability of slender UHPC structural members is being investigated in a research project, supported by the Deutsche Forschungsgemeinschaft at the TU Darmstadt. This article reports about the research activities and the most important findings of this project.

Obgleich UHPC vergleichbar bessere Materialeigenschaften aufweist als normalfeste (Normal-Strength-Concrete) und hochfeste (High-Strength-Concrete) Betone, kann diese Entwicklung unter bestimmten Randbedingungen zu einem Einbruch der Tragwerkszuverlässigkeit und damit zu einer Versagenswahrscheinlichkeit des Bauteils führen, die das normativ geforderte Zuverlässigkeitseiveau und damit das Sicherheitsbedürfnis nicht mehr erfüllt. Die Gesellschaft fordert jedoch für die Herstellung und die Nutzung von Bauwerken eine hinreichende Sicherheit von Menschen und Sachgütern vor deren Versagen und kann sich dabei auf einschlägige Rechtsgrundlagen stützen. Auch vor dem Hintergrund einer nachhaltigen Betonwerkstoffnutzung für die Errichtung von Bauwerken müssen Tragwerke daher in den verschiedenen Grenzzuständen ausreichend zuverlässig sein. Die Kenntnis der Tragwerkszuverlässigkeit innovativer Stützensysteme aus UHPC ist somit zwingend erforderlich, da durch diesen Hochleistungsbaustoff Anwendungsfälle realisiert werden könnten, für die noch keine ausreichenden baupraktischen Erfahrungen vorliegen und sich die Erkenntnisse, die für normal- und hochfesten Beton vorliegen, nicht ohne Weiteres auf UHPC übertragen lassen.

Ziel dieses Forschungsprojektes ist die Bestimmung der Tragwerkszuverlässigen von druckbeanspruchten Bauteilen aus UHPC in Abhängigkeit von den Material- und Systemeigenschaften sowie die Identifizierung von Anwendungsgrenzen konventioneller Stützen und von Innovationspotenzialen neuartiger Stützensysteme.

In diesem Beitrag wird dargestellt, wie geeignete numerische Modelle für UHPC entwickelt und versuchstechnisch abgesichert wurden. Eine effektive Maßnahme zur

Beurteilung der Tragwerkszuverlässigkeit schlanker Stützen aus UHPC bietet die stochastische Simulation. Es wird aufgezeigt, wie auf der Grundlage der Applikation des Adaptive-Importance-Samplings eine Analyse der Sensitivitäten der einzelnen Material- und Systemparameter und der Tragwerkszuverlässigkeit schlanker Stützen aus UHPC durchgeführt wurden. Die wesentlichen Ergebnisse wurden mit einem besonderen Augenmerk auf die Potenziale und Anwendungsbereiche innovativer Stützensysteme dargestellt.

2 Forschungsinhalte

2.1 Ausgangslage

Die im Rahmen des Forschungsprojektes durchgeföhrten wissenschaftlichen Untersuchungen zur Tragwerkszuverlässigkeit hochbeanspruchter Druckglieder aus UHPC bauten im Wesentlichen auf den Erkenntnissen von SCHMIDT, SIX [1] zur Tragwerkszuverlässigkeit schlanker Stahlbetonstützen aus normal- und hochfestem Beton auf. In [1] wurden Zuverlässigkeitsanalysen an gedrungenen und schlanken Stahlbetondruckgliedern aus normalfestem und hochfestem Beton durchgeführt. Auf Grundlage dieser Untersuchungen konnte festgestellt werden, dass sich die Versagensarten, die für die Tragwerkszuverlässigkeit maßgeblichen Einflussparameter, die Streuungen der Materialeigenschaften und somit auch die Tragwerkszuverlässigkeiten selbst mit zunehmender Betonfestigkeit verändern und sich somit die Erkenntnisse von normal- und hochfestem Beton nicht ohne weitere Untersuchungen auf ultrahochfesten Beton übertragen lassen.

Eine Aussage zu den erreichbaren Tragwerkszuverlässigkeiten druckbeanspruchter Bauteile aus UHPC war seinerzeit auf Basis der damals durchgeföhrten Untersuchungen nicht möglich. Vor diesem Hintergrund erfolgte die Untersuchung der Zuverlässigkeit schlanker Stützen aus UHPC am Institut für Massivbau der TU Darmstadt, welche dankenswerterweise von der Deutschen Forschungsgemeinschaft gefördert wurde.

2.2 Forschungsprogramm

Die wesentlichen Randbedingungen für die Umsetzung des Forschungsprojektes wurden bereits im Vorfeld auf Grundlage des aktuellen Forschungsstandes zum UHPC identifiziert. Da zum Langzeitverhalten von UHPC keine abgesicherten statistischen Daten zur Verfügung stehen, wurden die Untersuchungen unter kurzzeitiger Lasteinwirkung durchgeföhr, was insbesondere dem Grenzzustand der Tragfähigkeit hinreichend Rechnung trägt.

Die Zuverlässigkeitsuntersuchungen erfolgten auf Basis numerischer Berechnungsverfahren. Dabei wurden die bereits von anderen Forschungseinrichtungen im DFG-Schwerpunktprogramm SPP 1182 durchgeföhrten Versuche zum Material- und Bauteilverhalten verwendet. Zur Ermittlung der Versagenswahrscheinlichkeiten wurden

die numerischen Berechnungsverfahren um stochastische Simulationsverfahren erweitert, sodass der Einfluss der Streuungen der Material- und Systemparameter auf die Systemantwort berücksichtigt werden konnte. Zur Verifizierung des entwickelten Berechnungsmodells sowie der statistischen Parameter wurden insgesamt 14 Bauteilversuche mit entsprechender Materialbestimmung an gesondert hergestellten Prüfkörpern durchgeföhrt.

Die Untersuchungen sollten einen möglichst breiten Anwendungsbereich abdecken und auch innovative neuartige Stützensysteme – wie z. B. das unbewehrte Hohlkörperdruckglied aus UHPC – berücksichtigen. Da die numerischen Berechnungen unter Einsatz stochastischer Simulationsverfahren allerdings sehr zeitaufwendig sind, war es zwingend erforderlich, den Untersuchungsraum sukzessive einzuzgrenzen. Auf Grundlage der im Laufe des Forschungsprojektes gewonnenen Erkenntnisse wurden die Grenzen der Untersuchungsparameter wie folgt gewählt:

Querschnittsgeometrie:	quadratisch, rechteckig, rund Voll- & Hohlquerschnitt
Querschnittsmaße:	12 bis 40 cm
Beton:	Beton gemäß DIN EN 1992 [2] UHPC ($f_{ck} = 150 - 250 \text{ N/mm}^2$)
Stahl:	B500
Bewehrungsgrad:	0 bis 10 %
Schlankheit:	$\lambda \leq 200$
Lastverhältnis Q_k/G_k :	0 bis 4
bez. Exzentrizität e/h:	0,1 bis 2,0

3 Experimentelle Untersuchungen

3.1 Einleitung

Im Falle des Einsatzes neuer Werkstoffe ist eine anfängliche Validierung der Ansätze und Modelle als Grundlage zur Durchführung der Berechnungen ein notwendiger Schritt zur wirklichkeitsnahen Wiedergabe des Tragverhaltens. Aus den Dokumentationen der Versuchsreihen von KORDINA [3], MEHMEL et al. [4] und SCHWUCHOW [5] wurden die wesentlichen Ziele der eigenen Untersuchungen abgeleitet:

1. Überprüfung der Kenntnisse des Tragverhaltens von Stützen (Druckgliedern)
2. Bestimmung der Tragfähigkeit von UHPC-Stützen
3. Validierung des Rechenmodells
4. Abschätzung der Modellunsicherheiten

Bild 1 stellt das auf Grundlage dieser Zielsetzungen entwickelte Forschungsprogramm zusammenfassend dar.

Die Tragfähigkeitsuntersuchungen an den Stützen wurden in verformungskontrollierten Bauteilversuchen durchgeföhrt. Das Lichtraumprofil des Prüfrahmens ermöglichte den Einbau geschosshoher Stützen. Zur Erzielung einer hohen Schlankheit ($\lambda = 80$) ergab sich für eine Knicklänge von 2,79 m eine Querschnittshöhe von $h = 0,12 \text{ m}$ in Knickrichtung für die im Versuch anzusetzende

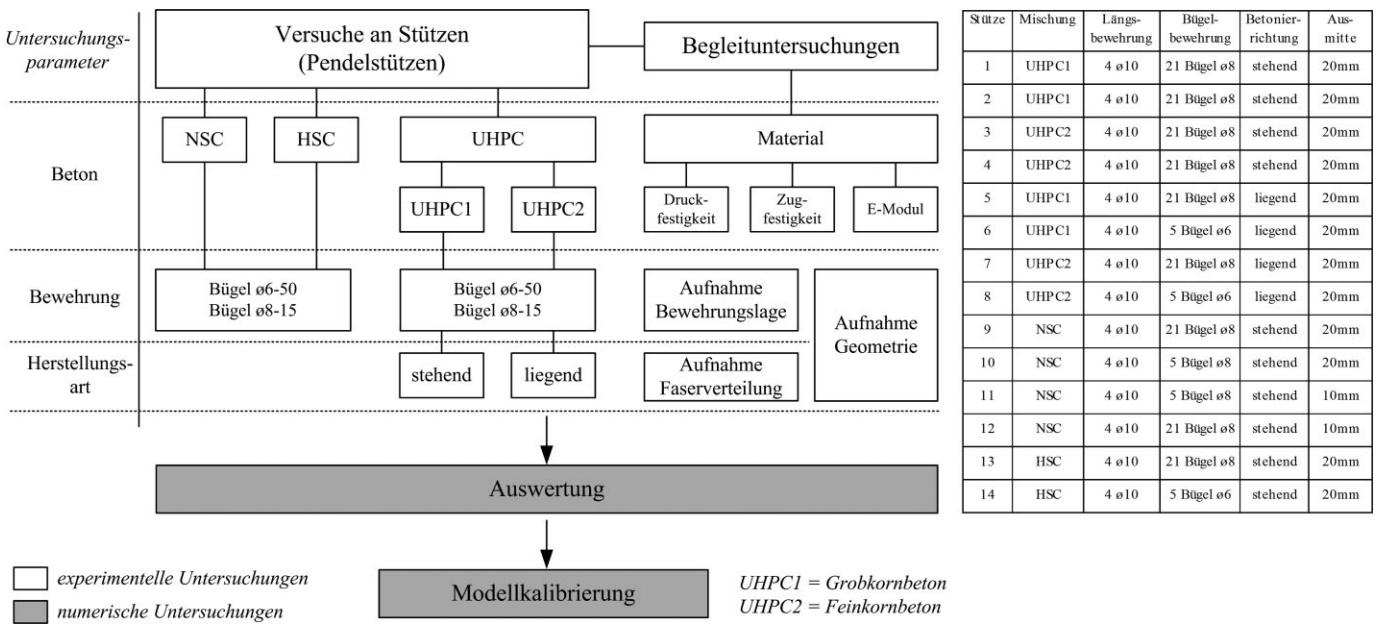


Bild 1 Forschungsprogramm zum Tragverhalten schlanker Stützen mit zugehörigem Versuchsprogramm
Concept of the Investigations on slender columns

Pendelstütze. Ergänzend zu den Bauteilversuchen wurden an gesondert hergestellten Prüfkörpern Druckfestigkeit, Biegezugfestigkeit und E-Modul bestimmt.

3.2 Zusammenfassung der Versuchsergebnisse

Die wichtigsten Ergebnisse der experimentellen Traglastversuche sind in Tab. 1 zusammengefasst. Neben den maximalen Traglasten sind auch die zugehörigen Verschiebungen in Stützenmitte aus den Haupt- und Nebenachsen angegeben. Diese Werte sind durch die aufgezeichnete Dehnung der DMS am Querschnittsrand auf der Zug- und Druckseite als Mittelwert des Messpaars ergänzt.

Aufgrund des begrenzten Versuchsprograms ließ sich keine abgesicherte Aussage über den Einfluss der Herstellart treffen. Eine zusätzliche Beobachtung aus den Versuchen identifizierte eine räumliche Inhomogenität im Bauteil. Es zeigte sich, dass das Versagen wider Erwartet nicht immer in Stützenmitte, dem Ort der höchsten Beanspruchung, auftrat. Die mittlere Abweichung vom idealen Versagenspunkt lag +5 cm über Stützenmitte. Die Standardabweichung betrug ± 18 cm. Insbesondere aus

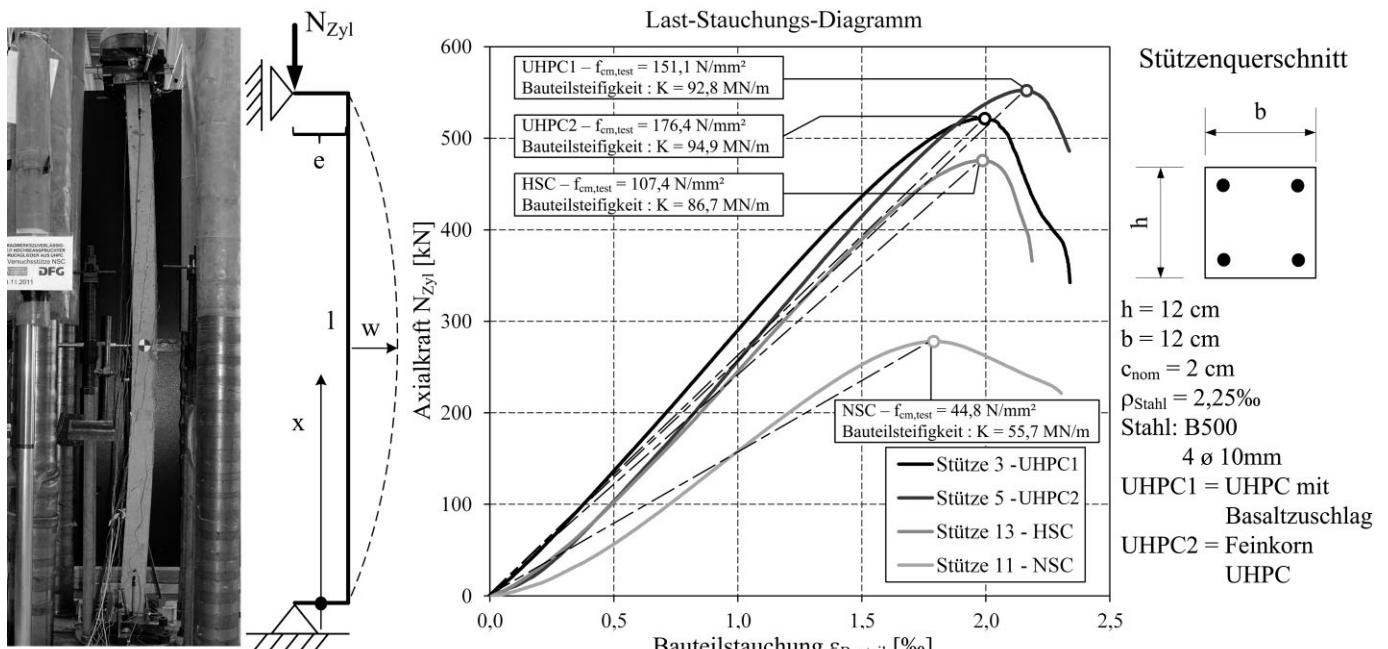


Bild 2 Last-Verformungs-Verhalten ausgewählter Stützen
Loadbearing-Behaviour of selected columns

Tab. 1 Ergebnisse der Stützenversuche
Results of experimental Tests

UHPC 1

Stütze	Exzentrizität [mm]	max. Versuchslast [kN]	Verschiebung Hauptachse [mm]	Verschiebung Nebenachse [mm]	ε_{DMS} Zugseite [mm/m]	ε_{DMS} Druckseite [mm/m]
stehend betoniert						
1	20	535,5	21,4	-0,3	1,45	-2,21
2	20	518,6	22,4	-0,5	0,81	-2,16
liegend betoniert						
5	20	552,3	20,5	-0,1	0,79	-2,14
6	20	558,6	20,6	-0,5	1,09	-2,18

UHPC 2

Stütze	Exzentrizität [mm]	max. Versuchslast [kN]	Verschiebung Hauptachse [mm]	Verschiebung Nebenachse [mm]	ε_{DMS} Zugseite [mm/m]	ε_{DMS} Druckseite [mm/m]
stehend betoniert						
3	20	522,0	21,8	0,3	1,83	-2,19
4	20	610,0	23,3	0,4	1,55	-2,34
liegend betoniert						
7	20	562,4	20,3	-1,1	1,77	-2,21
8	20	494,4	19,6	3,4	1,18	-2,06

NSC

Stütze	Exzentrizität [mm]	max. Versuchslast [kN]	Verschiebung Hauptachse [mm]	Verschiebung Nebenachse [mm]	ε_{DMS} Zugseite [mm/m]	ε_{DMS} Druckseite [mm/m]
9	20	260,5	19,4	-2,0	1,32	-1,98
10	20	278,0	19,8	-2,8	0,11	-1,85
11	10	407,8	14,8	1,4	0,27	-1,97
12	10	353,7	14,5	0,8	0,52	-1,42

HSC

Stütze	Exzentrizität [mm]	max. Versuchslast [kN]	Verschiebung Hauptachse [mm]	Verschiebung Nebenachse [mm]	ε_{DMS} Zugseite [mm/m]	ε_{DMS} Druckseite [mm/m]
13	20	475,9	19,9	0,2	0,79	-2,69
14	20	413,2	18,7	-0,4	-0,07	-1,49

der großen Standardabweichung ist abzuleiten, dass der Einfluss einer räumlichen Streuung der Bauteileigenschaften im Rahmen der stochastischen Modellierung zu untersuchen ist.

In verkürzter Zusammenfassung sind zur Abschätzung der Beeinflussung des Tragverhaltens der Stützen durch die eingesetzten Betonsorten in Bild 2 exemplarisch die Verläufe des Last-Verformungs-Verhaltens (Axialkraft über die Bauteilstauchung $\varepsilon_{\text{Bauteil}} = s_{\text{Vertikalverformung}}/l_{\text{Stütze}}$) ausgewählter Stützen unterschiedlicher Betone gegenübergestellt.

Im Diagramm in Bild 2 ist sehr gut die deutlich geringere Tragfähigkeit des Bauteils aus normalfestem Beton (NSC)

erkennbar. Die übrigen drei Bauteile aus HSC bzw. UHPC weisen ein zueinander ähnliches Verhalten auf. Die Darstellung bestätigt die Erwartung des vergleichbaren Tragverhaltens der Bauteile aus HSC und UHPC. Obwohl die Werte der Betonfestigkeiten von HSC und UHPC sehr stark differieren, wird die maximale Tragfähigkeit in vergleichbarer Größenordnung erzielt. Dies unterstützt die Hypothese, dass die Grenztragfähigkeit schlanker Druckglieder mit gleichem Querschnitt von der Steifigkeit des Materials dominiert wird. Die Versuche eigneten sich somit gut zur Validierung eines numerischen Berechnungsmodells, mit dem auch Stabilitätsver sagen abgebildet werden soll.

3 Ergebnisse begleitender Materialuntersuchungen

Parallel zu den Stützenversuchen wurden Betonfestigkeitsprüfungen der verwendeten Betone an separat hergestellten Prüfkörpern durchgeführt. Die Druckfestigkeiten des UHPC wiesen Serienmittelwerte am Normzyylinder zwischen $f_{c,cyl} = 156 \text{ N/mm}^2$ und $f_{c,cyl} = 175 \text{ N/mm}^2$ auf, wobei der Feinkornbeton tendenziell höhere Werte erzielte. Die Werte zeigten eine sehr gute Übereinstimmung mit den Ergebnissen des Ringversuches im Rahmen des SPP 1182 an.

In dem bei den numerischen Berechnungen verwendeten Modell für die Betonzugfestigkeit nach QUAST [6] wird dem Zugfestigkeitshöchstwert der Wert der zentrischen Betonzugfestigkeit zugewiesen. Die Grundlage hierzu bildeten Biegezugversuche. Für den 3-Punkt-Biegeversuch erlaubt der Sachstandsbericht „Ultrahochfester Beton“ [7] die Erfassung von Maßstabseffekten aus unterschiedlichen Abmessungen der Prüfkörper durch einen Anpassungsquotienten bei der Umrechnung auf die zentrische Zugfestigkeit. Basierend auf den Empfehlungen von JUNGWIRTH, MUTTONI [8] wurden 3-Punkt-Biegeversuche an Prismen mit den Abmessungen 80/80/320 mm³ durchgeführt und eine analytische Beziehung zwischen der zentrischen Zugfestigkeit und der Druckfestigkeit abgeleitet.

Als Ansatz für die Beschreibung des E-Moduls in Abhängigkeit von der Betondruckfestigkeit wurde aus DIN 1045-1 [9] folgende Beziehung gewählt:

$$E_c = \alpha_{Ec} \cdot f_c^{(1/3)} \quad (1)$$

Der Beiwert $\alpha_{Ec} = 9350$ wurde durch eine Auswertung eigener experimenteller Versuchsreihen bestimmt. Die statistische Analyse der Ergebnisse der Prüfungen ergab einen Variationskoeffizienten von $V\alpha_{Ec} = 4,7\%$. Dieses Ergebnis steht im Widerspruch zu den Variationskoeffizienten, die im Zusammenhang mit den Normbetonen NSC und HSC in der Literatur angegeben werden ($V\alpha_{Ec} = 15\%$, vgl. JCSS-PMC [10]). Eine Auswertung zahlreicher E-Modul-Prüfungen an Normbetonen unterschiedlicher Festigkeiten am Institut für Massivbau ergab einen Variationskoeffizienten von $V\alpha_{Ec} = 7,6\%$. Dieser Wert entspricht einer Verringerung gegenüber dem Ansatz im JCSS-PMC [10] um den Faktor 0,5. Der im JCSS-PMC [10] angegebene höhere Variationskoeffizient kann in einer grundsätzlichen Streuung der verwendeten, regional unterschiedlichen Zuschläge begründet sein. Vereinfacht wurde im vorliegenden Fall für den E-Modul von UHPC ein Variationskoeffizient von $V\alpha_{Ec} = 2 \cdot 4,7\% \approx 10\%$ in Ansatz gebracht. Detaillierte Angaben zu den formulierten Materialparametern und Betonwerkstofflinien von UHPC können [11] und [12] entnommen werden.

4 Numerische Modellierung von Stahlbetondruckgliedern

Die Berechnung von Versagenswahrscheinlichkeiten erfordert trotz leistungsfähiger Computer einen sehr hohen

Berechnungsaufwand, insbesondere wenn das Tragverhalten ausgeprägt nichtlinear ist. Das im Rahmen des Forschungsprojektes entwickelte Konzept zur Berechnung der Tragfähigkeit sah die Bildung des Gleichgewichts von Einwirkungs- und Widerstandsgröße mit inkrementeller Steigerung der Einwirkung vor. Ausgehend von einer planmäßigen Exzentrizität und einer zunächst sehr klein gewählten Normalkraft erfolgt eine Berechnung des Stabes bis zum Erreichen des Gleichgewichts unter Berücksichtigung der Zusatzbeanspruchungen aus den Auswirkungen der Theorie II. Ordnung. Die Normalkraft wird dann bis zum Erreichen eines Endzustandes gesteigert. Prinzipiell bildet diese Modellierungsform des Berechnungsvorgangs den kraftgesteuerten Versuch im Labor ab. Das Konzept hat sich für stochastische Untersuchungen, bei denen nicht die unmittelbare Widerstandsgröße, sondern primär die Indikation „Versagen“ oder „kein Versagen“ von Bedeutung ist, als vorteilhaft erwiesen. Der Endzustand erfordert dabei nicht die genaue Berechnung der Grenztragfähigkeit des Druckgliedes, was bei Simulationsverfahren eine deutliche Reduzierung der Rechenzeit ermöglichte.

Die durchgeföhrten Versuche dienten, neben der Bestimmung der Materialeigenschaften von UHPC, der Validierung des Rechenprogramms. Ziel der Programmvalidierung war die Überprüfung der Güte der Berechnungsergebnisse der programmierten Software-Applikation STAB bezüglich der implementierten Materialansätze für UHPC. Das im Forschungsprojekt gewählte Modell zur Berücksichtigung der Mitwirkung des Betons auf Zug nach QUAST [6] erfasst die Effekte des Tension-Stiffening durch einen einfachen Parameteransatz für die Betonzugfestigkeit. Dabei wird im Betonzugbereich ein zum Druck analoges Spannungs-Dehnungs-Verhalten mit einem rechnerischen Höchstwert der Betonzugspannung

$$f_{ct,calc} = \beta_{fct} \cdot f_{ctm} \quad (2)$$

mit zugehöriger Dehnung $\epsilon_{ctR,calc}$ unterstellt. Das weitere Spannungs-Dehnungs-Verhalten wird über eine Rechteckfunktion abgebildet. Die Kernaufgabe der Programmvalidierung lag in der Festlegung eines geeigneten Wertes für den freien Rechenparameter β_{fct} . Für einen Beiwert $\beta_{fct} = 0,7$ wurde dabei eine sehr gute Übereinstimmung mit den Versuchsergebnissen erzielt. Der Wert ist vergleichbar mit den üblichen Ansätzen für NSC ($\beta_{fct} = 0,60-0,65$).

Im Rahmen der Versuchsnachrechnung waren die Randbedingungen des Versuches zu berücksichtigen. Bei den geometrischen Randbedingungen wurden neben den genauen Bewehrungslagen je betrachteter Stütze auch die genauen Querschnittsabmessungen und somit auch die tatsächlichen Exzentrizitäten modelliert. Unter Beachtung dieser Randbedingungen erfolgte die Nachrechnung der Versuche. Um die Ergebnisse einer Bewertung zuführen zu können, wurde das Verhältnis zwischen experimenteller und numerischer Traglast

$$\theta = N_{Test}/N_{calc} \quad (3)$$

gebildet. Der Wert θ gibt dabei die Modellunsicherheit wieder. Die Auswertung aller Versuchsnachrechnungen ergab einen Mittelwert von $\theta_m = 0,97$ mit einem Variationskoeffizienten von $V_\theta = 0,07$. Ein statistischer Anpassungstest zeigte, dass der Ansatz einer Normalverteilung zur Beschreibung der Modellunsicherheit angebracht ist. Diese Ergebnisse liegen im Spektrum der im JCSPMC [10] empfohlenen Werte $\theta_m = 1,0$ und $V_\theta = 0,10$, welche in den weiteren Untersuchungen zugrunde gelegt wurden.

5 Untersuchungen zur Zuverlässigkeit schlanker Druckglieder aus UHPC

5.1 Grundlagen

Die Untersuchungen zur Zuverlässigkeit von Druckgliedern wurden mit dem eigens hierzu entwickelten Programm CORA durchgeführt. Nach Bestimmung des Bemessungswertes der Einwirkungen erfolgte die Berechnung der Versagenswahrscheinlichkeit der Stützensysteme unter Berücksichtigung streuender Eingangsgrößen mittels eines stochastischen Simulationsverfahrens. Hierzu wurde das Adaptive-Importance-Sampling als leistungsfähige Simulationsmethode um den Kern der Stützenberechnung erweitert. Bei dieser Methode wird die Stichprobenfunktion zur Identifikation des kritischen Bemessungspunktes aufgrund der Ergebnisse des vorangestellten Simulationslaufs sukzessive verbessert, was das Konzept der sequentiellen a-priori-Informationsverarbeitung zugrunde legt. Dabei wurde der Fokus auf die Abschätzung der Zuverlässigkeit in Abhängigkeit von der Schlankheit, der Querschnittsart der Stützen und der Lastexzentrität gelegt. Vor dem Hintergrund nur bedingt hinreichender Erkenntnisse der Materialparameter der Betonzugfestigkeit (Einfluss der Faserorientierung) und insbesondere des E-Moduls wurden spezielle Berechnungen zu diesen Parametern ergänzt. Begleitend zu den Zuverlässigkeitsberechnungen wurden Sensitivitätsanalysen zur Identifikation sensibler Basisvariablen durchgeführt.

5.2 Bemessung schlanker Stützen

Für eine realitätsnahe Vorhersage des Tragverhaltens schlanker Stahlbetonstützen ist das Gleichgewicht am verformten System (Theorie II. Ordnung) zu bilden. Zur Berücksichtigung der Effekte nach Theorie II. Ordnung erlaubt der NA der DIN EN 1992-1-1 [2] die Bemessung auf Basis der nichtlinearen Schnittgrößenermittlung nach KÖNIG, AHNER [13]. Unter Ansatz der Rechenwerte der Baustoffeigenschaften erfolgte die Ermittlung der Traglast des Druckgliedes R_{calc} , woraus sich durch Division mit dem Sicherheitsfaktor 1,3 der normative Bemessungswert R_d ableiten ließ. Mit der nach DIN EN 1990 [14] (Gl. 6.10) normativ beschriebenen Nachweisgleichung wurden unter Ansatz der Teilsicherheitsbeiwerte nach DIN EN 1991-1-1/NA [2] für γ_Q und γ_G die Mittelwerte der Einwirkungen ermittelt.

5.3 Festlegung der Basisvariablen

Die Zuverlässigkeit lässt sich als Funktion der Versagenswahrscheinlichkeit beschreiben. Die Versagenswahrscheinlichkeit kann durch statistische Auswertungen empirischer Kenngrößen abgeschätzt werden. Grundsätzlich lassen sich drei Gruppen zufälliger Einflussgrößen auf die Zuverlässigkeit unterscheiden:

1. Statistische Unschärpen, die durch zufällige Prozesse in der Natur gegeben sind
2. Mess- und Datenunschärpen, z. B. durch zeitlich ungenügende Aufzeichnungen
3. Unschärpen der Eigenschaften aus der unzureichenenden Modellierung des Objektes

Auf Grundlage der Datenbasis des JCSPMC [10] wurden die statistischen Kennwerte der Basisvariablen festgelegt. Darüber hinaus wurden die Parameter zu den Materialeigenschaften von UHPC aus den Ergebnissen der experimentellen Untersuchungen bzw. der Untersuchungen des SPP 1182 abgeleitet. Die im Rahmen des Forschungsprojektes angesetzten Basisvariablen sind in der Tab. 2 zusammengefasst.

5.4 Numerische Berechnung der Zuverlässigkeit schlanker Druckglieder aus UHPC

Die wesentlichen Ergebnisse der Zuverlässigkeitsanalysen sind in den Bildern 3 bis 4 dargestellt. Im Hinblick auf eine anschauliche Darstellung der Wichtungsfaktoren α^2 wurden die insgesamt zehn streuenden Basisvariablen in die Gruppen der Modellunsicherheiten, der Einwirkungen, des Materialwiderstandes und der geometrischen Größen zusammengefasst. Die Gruppenwichtungsfaktoren können dabei anhand der schwarzen Grenzlinien zwischen den einzelnen Gruppen abgelesen werden. Zusätzlich sind die Gewichte der einzelnen Basisvariablen, sowohl für alle Wichtungsfaktoren als auch in ausgewählten Fällen für die Gruppe der Materialwiderstände, in Form von Flächendiagrammen hinterlegt. Durch diese Darstellung lässt sich der vorherrschende Versagensmechanismus leicht erkennen.

Die Berechnung der in Bild 3 dargestellten Zuverlässigkeitsindizes β für Druckglieder aus normalfestem Beton C30 und hochfestem Beton C80 in Abhängigkeit von der Schlankheit für die bezogene Kopfausmitte $e/h = 0,1$ lässt eine gleichmäßige Degradation des Zuverlässigkeitssniveaus erkennen. Dies bestätigt die Erkenntnisse aus den Zuverlässigkeitsuntersuchungen an schlanken Druckgliedern von SCHMIDT, SIX [1]. Im Fall von UHPC2 ist dagegen für eine gegebene Lastexzentrität $e/h = 0,1$ bereits bei mäßigen Schlankheiten ein Einbruch der Zuverlässigkeit zu verzeichnen. Dies führt zu einer Unterschreitung des Zielzuverlässigkeitssniveaus von $\beta_{Ziel,1a} = 4,1$ für den Grenzzustand der Tragfähigkeit bei einem Bezugszeitraum von 1 Jahr (vgl. [11]).

Tab. 2 Basisvariablen der Zuverlässigkeituntersuchungen
Basic variables for the Reliability Analysis

Eigenschaft	Variable	Bestimmung	Verteilungstyp	Mittelwert	Einheit	Std.abweichung	Var.-koeffizient	Bemerkungen
UHPC (Mittelwerte für C150)								
Betondruckfestigkeit	f_c	$f_{ck} \cdot (1 + 0,06 \cdot 1,645)$	Log-Normal	164,8	[N/mm ²]	–	0,06	Auswertung aus Versuchen
Betonhöchstwertdehnung	ε_{c1}	$-0,000126 \cdot f_c^{(2/3)}$	–	–	–	–	–	Auswertung aus Versuchen
Betonbruchpunkt	ε_{cu}	$\varepsilon_{cl} \cdot 2,305$	–	–	–	0,326	–	Auswertung aus Versuchen
Elastizitätsmodul	E_c	$\alpha_{Ec} f_c^{(1/3)}$	Log-Normal	51.260	[N/mm ²]	2,510	–	Auswertung aus Versuchen
Elastizitätsmodul Faktor	α_{Ec}	deterministisch	–	9,350	–	–	0,049	Auswertung aus Versuchen
Anpassungsparameter	m	deterministisch	–	1,078	–	–	–	Auswertung aus Versuchen
Plastizitätszahl	k	$m \cdot E_c \cdot \varepsilon_{cl} / f_c$	–	1,271	–	–	–	Berechnung aus m, f_c , ε_{cl} , α_{Ec}
Exponent Arbeitslinie	n	deterministisch	–	1,88	–	–	–	Auswertung aus Versuchen
Betonzugfestigkeit	f_{ct}	$\alpha_{ct} \cdot f_c^{(2/3)}$	–	13,5	[N/mm ²]	2,0	–	Korrelation zu α_{ct}
Beiwert Betonzugfestigkeit	α_{ct}	deterministisch	–	0,45	–	–	0,15	Auswertung aus Versuchen
Arbeitslinie	$\sigma_c = f_c \cdot (k \cdot n - \eta) / (1 + (k - 2) \cdot \eta)$	–	–	–	–	–	–	–
Stahl								
Stahlstreckgrenze	f_y	$f_{yk} \cdot 1,10$	Log-Normal	550	[N/mm ²]	33,0	0,06	gem. EC-2
Stahlbruchgrenze	f_u	$f_y \cdot 1,05$	–	578	[N/mm ²]	–	–	gem. EC-2 & JCSS-PMC(2003)
Streckdehnung	ε_y	f_y/E_s	–	0,00275	–	–	–	gem. EC-2
Stahlbruchgrenze	ε_u	deterministisch	–	0,02500	–	–	–	gem. EC-2
Elastizitätsmodul	E_s	deterministisch	–	200.000	[N/mm ²]	–	–	gem. EC-2
Arbeitslinie		trilinear	–	–	–	–	–	–
Geometrie								
Bewehrungsdurchmesser	d_s	–	Normal	d_{sm}	[mm]	–	0,02	gem. JCSS-PMC(2003)
Querschnittshöhe	h	–	Normal	h_m	[m]	0,005	–	gem. JCSS-PMC(2003)
Querschnittsdurchmesser	d	–	Normal	d_m	[m]	0,005	–	gem. JCSS-PMC(2003)
Querschnittswandstärke	t_x	–	Normal	$t_{x,m}$	[m]	0,005	–	gem. JCSS-PMC(2003)
Betondeckung	c	–	Normal	c_{nom}	[m]	0,005	–	gem. JCSS-PMC(2003)
Modellunsicherheit								
Modellunsicherheit	θ	deterministisch	Normal	1,00	[mm]	–	0,10	gem. JCSS-PMC(2003)
Einwirkungen								
ständige Einwirkungen	G	$G_m = G_k = \frac{R_d}{\gamma_G + Q_k / G_k \cdot \gamma_Q}$	Normal	G_m	[kN]	–	0,10	gem. JCSS-PMC(2003)
veränderliche Einwirkungen	Q	$G_m = G_k = Q_k / G_k \cdot \frac{1}{1,746}$	Gumbel	Q_m	[m]	–	0,40	gem. JCSS-PMC(2003)

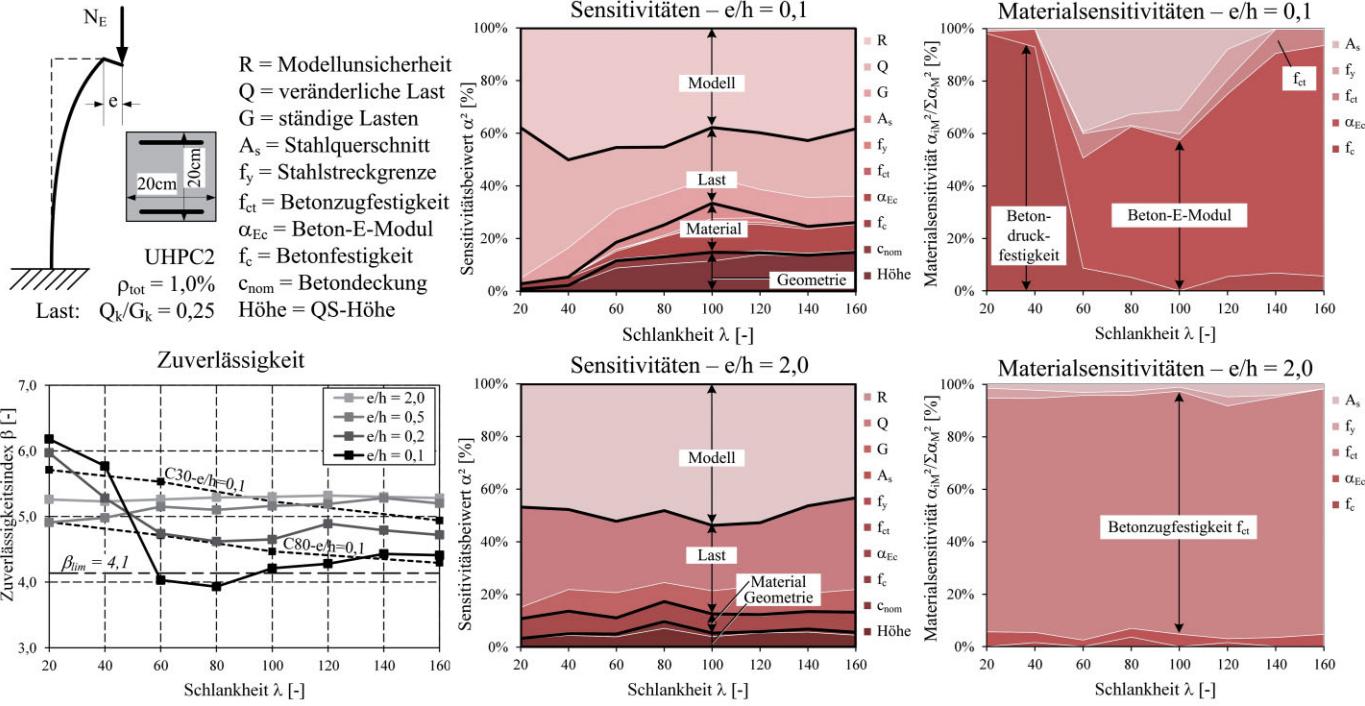


Bild 3 Zuverlässigkeit für einen kleinen Querschnitt in Abhängigkeit von der Schlankheit und der Lastexzentrizität
Results of the Reliability Analysis on slender columns with a small cross-section

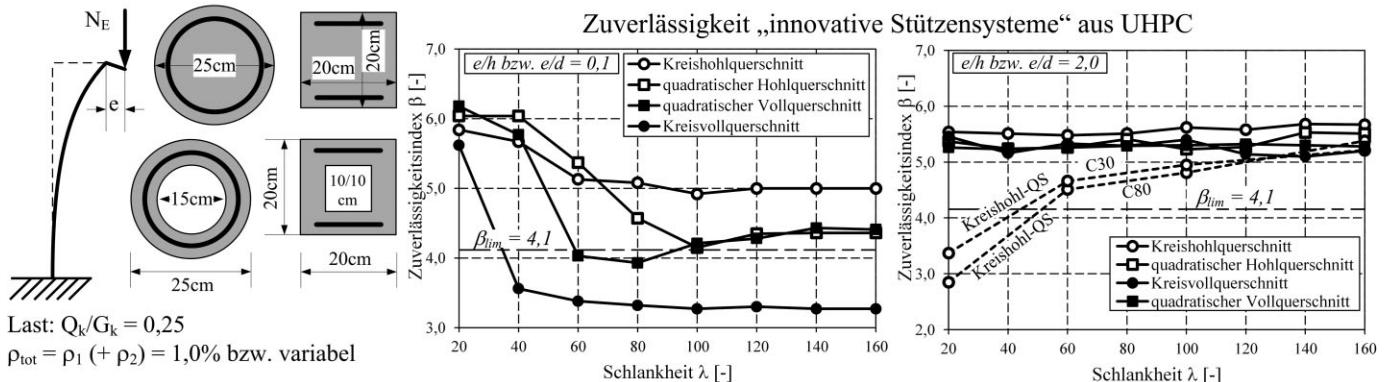


Bild 4 Zuverlässigkeit für verschiedene Querschnitte in Abhängigkeit von der Schlankheit und der Lastexzentrizität
Results of the Reliability Analysis on slender columns with different cross-section

Für größere Lastexzentrizitäten fällt dieser Rückgang zunehmend gemäßiger aus, wobei sich bei Lastexzentrizitäten von $e/h \geq 0,5$ ein gleichmäßiges Zuverlässigkeitssniveau einstellt. Für die beiden Grenzbereiche $e/h = 0,1$ und $e/h = 2,0$ ist für diese Zuverlässigkeitsberechnung das Ergebnis der Sensitivitätsstudie dargestellt. Anhand der Wichtungsfaktoren der Gruppen in Bild 3 ist zu erkennen, dass bei einem geringen Anteil von veränderlichen Lasten an der Gesamtlast ($Q_k/G_k = 0,25$) der Einfluss der Widerstands- und GeometrievARIABLEN im Mittel 20 %, der Modellunsicherheiten 45 % und der Lastvariablen etwa 35 % beträgt. Das in Bild 3 hinterlegte Flächendiagramm mit den Wichtungsfaktoren der einzelnen WiderstandsvARIABLEN (Material und Geometrie) zeigt für Ausmitten $e/h = 0,1$ erwartungsgemäß für kleine Schlankheiten einen großen Einfluss der Betondruckfestigkeit f_c am Versagen. Bei größerer Schlankheit, bei der sich der Einbruch der Zuverlässigkeit einstellt, überwiegt dagegen deutlich

der Einfluss des Elastizitätsmoduls des Betons. Bei großen Lastexzentrizitäten ($e/h = 2,0$) ist dagegen unabhängig von der Schlankheit eine klare Dominanz der Betonzugfestigkeit unter Berücksichtigung der Faserwirkung im UHPC zu erkennen. Aus diesen Sachverhalten ist der Schluss zu ziehen, dass bei großen Schlankheiten und kleinen Ausmitten das Stabilitätsversagen des Druckgliedes maßgebend wird. Das Versagen wird von den Material- und Querschnittssteifigkeiten bestimmt. Im Fall großer Ausmitten führt die Einwirkung dagegen zu einem klassischen Biegeversagen.

Rückschlüsse auf die Abgrenzung sinnvoller Anwendungsbereiche erlauben die in Bild 4 dargestellten Ergebnisse konventioneller und innovativer Stützensysteme. Auf Grundlage der Ergebnisse aus der Betrachtung der Schlankheit wurde hier die Berechnung auf die als kritische Ausmitten identifizierte Lastexzentrizität von

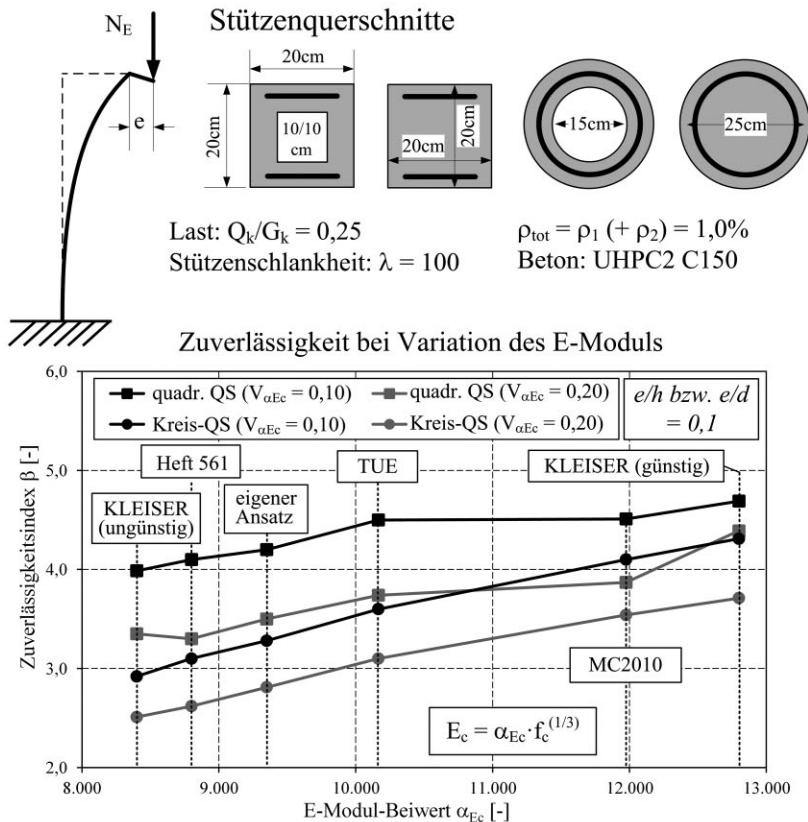


Bild 5 Entwicklung der Zuverlässigkeit bei Variation der Materialwerte von Beton-E-Modul und Betonzugfestigkeit und Ergebnisse der Zuverlässigungsberechnung unter Ansatz eines räumlichen Zufallsfeldes
Development of the Reliability level by taking into account a different Variation for the UHPC-E-Modulus and the UHPC-tensile strength and Results of the Reliability Analysis applying the Random-Field-Method

$e/h = 0,1$ reduziert. Dem Bild 3 kann entnommen werden, dass die Anwendung des Bemessungskonzeptes nach DIN EN 1992-1-1/NA [12] auf UHPC-Stützen mit Kreisquerschnitt einen Einbruch der Zuverlässigkeit unter das geforderte Ziellniveau bewirkt. Wesentlich effizienter gestaltet sich dagegen der Einsatz von Hohlkörperdruckgliedern. Gegenüber den Stützen mit Vollquerschnitt ist hier ein deutlich abgeschwächter Rückgang der Zuverlässigkeit zu verzeichnen. Bedingt durch das günstigere Verhältnis zwischen Material- und Querschnittssteifigkeit verbleibt der Wert der Tragwerkszuverlässigkeit auch bei großer Schlankheit λ über dem normativ anzustrebenden Mindestwert des Zuverlässigkeitssindex von $\beta_{lim} = 4,1$.

Eine komplementäre Entwicklung der Zuverlässigkeit ist bei großer Lastexzentrizität zu erkennen. Hier weisen die Stützen mit Vollquerschnitt gegenüber den Hohlkörperstützen ein stabiles Zuverlässigkeitssniveau auf. Das positive Potenzial der UHPC-Hohlkörperstützen wird darüber hinaus im Vergleich zu denen aus NSC deutlich. Bei den NSC-Stützen mit Kreishohlquerschnitt wird das Versagen nahezu ausschließlich durch die Modellunschärfe und die Einwirkungen bestimmt. Ihre großen Streuungen bedingen ein niedriges Zuverlässigkeitssniveau. Bei größerer Schlankheit tritt dagegen zunehmend Systemversagen auf, was insgesamt die Streuung des Tragwiderstandes verringert und dadurch einen Anstieg der Zuverlässigkeit bewirkt.

Für die Festlegung der Basisvariablen konnte bei dem Materialparameter zur Bestimmung des E-Moduls nicht auf eine gesicherte Datenbasis zurückgegriffen werden, da die Eigenschaften des E-Moduls bei UHPC nicht explizit im Rahmen des SPP 1182 untersucht wurden. Aus diesem Grund wurden neben dem eigenen, versuchstechnisch abgesicherten Ansatz auch Betrachtungen der Zuverlässigkeit anderer Ansätze (vergleiche TUE et al. [15], MC-2010 [16] und DAfStb Heft 561 [7]) vorgenommen.

Bild 5 zeigt für die Vollquerschnitte die Entwicklung der Zuverlässigkeit bei Variation des E-Modul-Biwertes α_Ec . Aufgetragen ist die Zuverlässigkeit für einen Variationskoeffizienten von $V\alpha_Ec = 0,1$ und $V\alpha_Ec = 0,2$. Die Ansätze nach KLEISER [17] berücksichtigen darüber hinaus die Wirkung einer ungünstigen bzw. günstigen Faserausrichtung. Es ist ersichtlich, dass das Zuverlässigkeitssniveau signifikant vom zugrunde gelegten Ansatz abhängt. Die Faserausrichtung kann neben der Beeinflussung der Mittelwerte der einzelnen Parameter auch eine Veränderung des jeweiligen Variationskoeffizienten bewirken. Aus diesem Grund ist zur Abschätzung eines solchen Effektes die Zuverlässigkeit für verschiedene Variationskoeffizienten $V\alpha_{ct}$ angegeben worden (Bild 5 oben rechts). Der Rückgang des Zuverlässigkeitssniveaus ist bei diesen Randbedingungen bei den Hohlstützen besonders ausgeprägt.

Bei den Untersuchungen zugrunde liegenden Berechnungsmodell wurde immer unterstellt, dass die Materialeigenschaften an jeder Stelle des Druckgliedes gleich sind. Für eine wirklichkeitsnähere Abbildung der Verteilung der Materialeigenschaften innerhalb des Bauteils wurde als Tastrechnung der Ansatz eines geometrischen Zufallsfeldes (Random-Field) gewählt. Grundlage des Modells zur Erfassung der räumlichen Streuung ist die Korrelationsfunktion.

$$f_{ct,i} = f_{ct,(i-1)} \cdot \rho_{act} + (1 - \rho_{act})^{0.5} \cdot Y_i \quad (4)$$

Hierin gibt $f_{ct,i}$ den Wert der Betonzugfestigkeit im Stabelement i an. Die Variable $f_{ct,(i-1)}$ ist der Wert des entsprechenden Nachbarelements. Der Parameter ρ_{act} ist der von der Stablänge abhängige Korrelationsbeiwert und Y_i eine normalverteilte Zufallsgröße. Da es keine abgesicherte Datenbasis zum räumlichen Streuungsverhalten bei faserbewehrten UHPC-Stützen gibt, wurde für Y_i die gleiche Streuung wie für die Grundgesamtheit der Betonzugfestigkeit angesetzt (vgl. Tab. 2). Für die Festlegung eines geeigneten Korrelationsbeiwertes liegen ebenfalls keine Untersuchungsergebnisse vor, welche die Angabe einer versuchstechnisch belegten Korrelationsfunktion erlauben. Entsprechend wurde die Untersuchung als Parameterstudie angelegt. In Bild 5 (unten rechts) zeigen die Ergebnisse, dass bei kleinem Querschnitt die volle Korrelation mit $\rho_{act} = 1,0$ günstige Werte liefert. Für Korrelationskoeffizienten von $\rho_{act} < 1,0$ stellen sich hingegen niedrigere Zuverlässigkeitswerte ein. Eine detailliertere stochastische Modellierung unter Ansatz einer räumlichen Korrelation ausgewählter Parameter erscheint insbesondere bei faserbewehrten Bauteilen daher ratsam.

6 Resümee und Ausblick

Der Einsatz ultrahochfester Betone erlaubt eine Erweiterung des Anwendungsbereichs bisher üblicher und bewährter Massivbaukonstruktionen. Zur Identifizierung sinnvoller Anwendungsbereiche von UHPC wurde daher die Tragwerkszuverlässigkeit schlanker Stützen aus UHPC untersucht. Auf Grundlage verfügbarer Forschungsergebnisse zu UHPC wurden hierzu zunächst geeignete Materialmodelle hergeleitet und das Tragverhalten von Druckgliedern aus UHPC durch Versuche be-

stimmt. Die Erkenntnisse der experimentellen Untersuchungen bildeten im Weiteren die Grundlage der numerischen Modellierung. Die Zuverlässigkeitssensitivitätsstudien führten zu der Erkenntnis, dass bei großer Schlankheit und kleiner Ausmitte das Stabilitätsversagen des Druckgliedes maßgebend wird, was einen Einbruch der Tragwerkszuverlässigkeit bedingt. Durch die Erweiterung der Zuverlässigkeitssensitivitätsberechnungen auf Hohlkörperstützen konnte durch das günstigere Verhältnis zwischen Material- und Querschnittssteifigkeit das höhere Zuverlässigkeitseiveau derartiger innovativer Stützensysteme für kleine Lastexzentritäten aufgezeigt werden. Bei großen Ausmittten ist dagegen, bezogen auf die Schlankheit, mit einer stabilen Zuverlässigkeit zu rechnen.

Darüber hinaus wurde ein Defizit im Kenntnisstand der Materialeigenschaften von UHPC für die geeignete Modellierung des E-Moduls festgestellt. Vor dem Hintergrund der aus den Untersuchungsergebnissen abgeleiteten erheblichen Bedeutung dieses Materialparameters ist es zu empfehlen, die vorhandene Wissenslücke durch weitere Forschungsaktivitäten zu schließen. Wie weiterhin gezeigt werden konnte, weisen die Effekte der Faserausrichtung einen signifikanten Einfluss auf die Materialparameter des E-Moduls und der Betonzugfestigkeit und damit auch auf die Zuverlässigkeit von UHPC-Stützen auf. Die Erweiterung der stochastischen Modellierung durch Zufallsfelder zur Erfassung der räumlichen Veränderung der Materialeigenschaften eröffnet demgegenüber eine präzisere Abschätzung des Zuverlässigkeitseivaus schlanker Stützen. Die Erforschung der räumlichen Verteilung der Materialeigenschaften von UHPC steht noch aus.

Um die positive Entwicklung des Anwendungsbereichs von UHPC weiter zu fördern, sollte die zukünftige Forschung auch die Zuverlässigkeitsoptimierung unbewehrter UHPC-Druckglieder in den Fokus stellen. Unter Beachtung der geforderten Zuverlässigkeit der Tragstruktur eröffnet dies der Baupraxis die Umsetzung neuartiger Herstellungsmethoden, wie das Extrudierverfahren von Hohlstützen. Darüber hinaus sehen die Autoren, neben dem Aspekt des ressourcenschonenden Materialeinsatzes, das spannende Innovationspotenzial einer bauteilintegrierten Installations- und Raumlufttechnik.

Literatur

- [1] SCHMIDT, H.; SIX, M.: *Probabilistische Modellierung hochfester Stahlbetonstützen in Hochhäusern*. Beton- und Stahlbetonbau 102 (2007), Heft 12, S. 859–868.
- [2] DIN EN 1992-1-1/NA (2011): Eurocode 2: *Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau – Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter*. Nationaler Anhang DIN EN 1992-1-1/NA:2011-01, DIN Deutsches Institut für Normung, Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2011.
- [3] KORDINA, K.: *Knicksicherheitsnachweis ausmittig belasteter Druckglieder*. Beton- und Stahlbetonbau 59 (1964), Heft 8, S. 181–190.
- [4] MEHMEL, A.; SCHWARZ, H.; KASparek, K.-H.; MAKovi, J.: *Tragverhalten ausmittig beanspruchter Stahlbetondruckglieder*. DAfStb. Heft 204, Ernst & Sohn Verlag, Berlin, 1969.
- [5] SCHWUCHOW, R.: *Probabilistische Zuverlässigkeitssensitivitätsanalysen für schlanke Stahlbetonstützen auf Basis der Quasi-Monte Carlo Methode*. Dissertation TU Cottbus, Cottbus, 2009.

- [6] QUAST, U.: *Programmgesteuerte Berechnung beliebiger Massivbauquerschnitte unter zweiachsiger Biegung mit Längskraft*. In: DAfStb Heft 415, Beuth Verlag GmbH, Berlin, 1990.
- [7] DAfStb Heft 561: *Sachstandsbericht Ultrahochfester Beton*. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton – Heft 561, Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2008.
- [8] JUNGWIRTH, J.; MUTTONI, A.: *Versuche zum Tragverhalten von ultrahochfestem Beton – Teil I Materialversuche*. Bericht 00.02.R3, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Institut de structures – Construction en béton, Lausanne, 2004.
- [9] DIN 1045-1 (2008): *Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton – Teil 1: Bemessung und Konstruktion*. DIN 1045-1:2008-08, Deutsches Institut für Normung, Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2008.
- [10] JCSS-PMC (2003): *Probabilistic Model Code Part I-III*. Joint Committee on Structural Safety (JCSS), Zürich, 2003.
- [11] HEIMANN, M.; SCHMIDT, H.; GRAUBNER, C.-A.: *Probabilistic Modelling of UHPC Slender Columns*. In: Ultra-High Performance Concrete and Nanotechnology in Construction (HIPERMAT), ISBN: 978-3-86219-264-9, Kassel University Press GmbH, Kassel 2012.
- [12] HEIMANN, M.: *Reliability of highly stressed UHPC slender columns*. In: Proceedings of the 9th fib international PHD symposium in civil engineering, S.145-165, Hrsg: MÜLLER; HAIST; ACOSTA, ISBN: 978-3-86644-858-2, KIT Scientific Publishing, Karlsruhe, 2012.
- [13] KÖNIG, G.; AHNER, C.: *Sicherheits- und Nachweiskonzept der nichtlinearen Berechnung im Stahl- und Spannbetonbau*. In: Sicherheit und Risiko im Bauwesen – Grundlagen der praktischen Anwendung, TU Darmstadt, Darmstadt, 2000.
- [14] DIN EN 1990 (2010): Eurocode 0: *Grundlagen der Tragwerksplanung*. DIN EN 1990:2002 + A1:2005 A1:2005/AC:2010, DIN Deutsches Institut für Normung, Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2010.
- [15] TUE, N.; DEHN, F.; SCHNEIDER, H.; MA, J.; ORGASS, M.; SCHENCK, G.; KÜCHLER, M.: *Das Verbundrohr als Innovationsmotor für hybrides Bauen*. Forschungsbericht, Universität Leipzig, Bau- und Wirtschaftsingenieurwesen, Leipzig, 2004.
- [16] MC-2010 (2010): *CEB-FIP: Model Code 2010*. März, 2010, International Federation for Structural Concrete (fib), Lausanne, 2010.
- [17] KLEISER, K.: *Zum Tragmechanismus von Stahlfaserbeton*. Berichte Konstruktiver Ingenieurbau, Heft 42, Vulkan Verlag, Essen, 1984.

Autoren



Dipl.-Ing. Martin Heimann
Technische Universität Darmstadt
Institut für Massivbau
Petersenstraße 12
64287 Darmstadt
heimann@massivbau.tu-darmstadt.de



Dr.-Ing. Holger Schmidt
BERNHARDT Ingenieure GmbH
Birkenweg 9
64295 Darmstadt
schmidt@bernhardt-ingenieure.de



Dr.-Ing. Ngoc Linh Tran
tran@massivbau.tu-darmstadt.de



Prof. Dr.-Ing.
Carl-Alexander Graubner
graubner@massivbau.tu-darmstadt.de

Technische Universität Darmstadt
Institut für Massivbau
Petersenstraße 12
64287 Darmstadt