

*o.Univ.-Prof. DI Dr. Johann Kollegger und DI Dr. techn. Stefan L. Burtscher*

## *Bruchversuche an hochbewehrten Schleuderbetonstützen Tragfähigkeit und Bemessungsmodell*

### *1 Einleitung*

Anforderungen an die Wirtschaftlichkeit und die Formschönheit von Konstruktionen haben Tragwerksplaner und Planer immer wieder dazu veranlasst, die Abmessungen von Traglelementen zu minimieren und Spannweiten zu vergrößern. Bei den in diesem Beitrag untersuchten Stützen erfolgt die Erhöhung der Traglast durch den Einsatz von hochfestem Beton und hohen Bewehrungsgraden. Wegen den besonders hohen Bewehrungsgraden können die Stützen nicht mehr konventionell betoniert werden, sondern werden mit dem Schleuderbetonverfahren erzeugt. Mit der Herstellung in einer Stahlschalung und durch das Schleudern wird erreicht, dass die Bewehrungsstäbe allseitig gut mit Beton ummantelt sind. Durch den Einsatz von hohen Bewehrungsgraden und hochfestem Beton ist es möglich, die gleichen Tragfähigkeiten wie bei Verbundstützen zu erreichen. Der Vorteil der Schleuderbetonstützen liegt, neben der dichten und porenfreien Oberfläche, auch in der kostengünstigen Herstellung.

Die Bewehrungsgrade in der Österreichischen Norm und auch anderen europäischen Normen sind mit 5 bis 9 % nach oben hin beschränkt. Die Beschränkung der Bewehrung ist beim konventionellen Betonieren notwendig, da ansonsten die Verarbeitbarkeit und der gute Verbund zwischen Beton und Stahl nicht gewährleistet werden können. Bei Schleuderbetonstützen ist die Verdichtungsenergie viel höher, was auch höhere Bewehrungsgrade erlaubt.

Um diese Technologie abzusichern und ein Bemessungskonzept für Stützen mit dieser Tragfähigkeit zu entwickeln, wurde am Institut für Stahlbeton- und Massivbau der TU Wien, in Zusammenarbeit mit den Firmen MABA Fertigteilindustrie GmbH und Stoiser & Wolschner Umwelttechnik GmbH, ein Forschungsprojekt initiiert, mit dem Ziel, eine Zulassung für Schleuderbetonstützen aus hochfestem Beton und mit hohen Bewehrungsgraden zu erhalten. Um das Bemessungs-

konzept abzusichern, wurden zerstörende Versuche an den Schleuderbetonstützen durchgeführt.

Es handelt sich bei Stützen um wichtige tragende Bauteile, deren Versagen katastrophale Folgen für die gesamte Struktur haben kann. Es ist deshalb von besonderer Wichtigkeit, dass die Versuche wirklichkeitsnah durchgeführt werden. Um Effekte aus Skalierungen, Randschichteffekte, Hydratation usw. zu vermeiden, wurden die Stützen mit den Abmessungen, wie sie auch auf der Baustelle eingesetzt werden, getestet. Dies hat zur Folge, dass die Prüfmaschine besonders hohe Kräfte und große Abmessungen aufweisen muss. Im gemeinsam betriebenen Labor des Instituts für Stahlbeton- und Massivbau und des Instituts für Stahlbau wurde vor zirka fünf Jahren eine derartige Prüfmaschine aufgebaut.

### *2 Der große Prüfrahm an der TU Wien*

Der Rahmen hat ein Gewicht von 200 t und die äußeren Abmessungen von 11,1 x 5,1 x 4,5 m [1]. Er wurde aus I-Trägern mit einer Trägerhöhe von 1.500 mm, einer Flanschbreite von 600 bis 800 mm und einer Flanschdicke von 40 bis 80 mm errichtet. Die Stäbe sind biegesteif miteinander verbunden und bilden einen dreidimensionalen Rahmen mit einer verwindungssteifen Grundplatte (Bild 1).

Der Rahmen wurde für eine horizontale Maximalkraft von 30.000 kN konstruiert. Derzeit ist die Ausrüstung für eine statische Belastung von 20.000 kN und eine dynamische von 17.000 kN vorhanden. Die Kraft wird mit vier hydraulischen Pressen erzeugt.

Die Druckplatte auf der Seite der Zylinder kann sich in alle Richtungen frei bewegen. Die Kalotten erlauben eine Verdrehung von  $\pm 7^\circ$ , der Gesamthub der hydraulischen Zylinder beträgt 250 mm. Die vertikale Fest-

haltung der Druckplatte erfolgt mit Pendelstützen auf beiden Seiten der Platte. Die Versuchskörper werden über eine Adapterplatte mit der Prüfmaschine fest verbunden.

Auf der anderen Seite des Prüfkörpers befindet sich ein Linienkipplager. Das Linienkipplager wird auf einen Widerlagerbock geschraubt, der das Lager in horizontaler und vertikaler Lage hält. Zwischen Widerlagerbock und Pressenträger werden Distanzmodule eingebaut, um die Prüflänge variieren zu können. Die Versuchskörper können eine maximale Länge von 5,0 m und einen Querschnitt von 1,0 x 1,0 m besitzen.

### 3 Druckversuche an Schleuderbetonstützen

#### 3.1 Ziel der Untersuchungen

Das Ziel des Forschungsvorhabens war die Entwicklung einer Stahlbetonstütze mit erhöhter Tragfähigkeit bei Einhaltung der Brandwiderstandsklasse F90. Darüber hinaus sollte der Tragfähigkeitsnachweis ähnlich wie bei herkömmlichen Stützen zu führen und einfach anwendbar sein. Für Schleuderbetonstützen gibt es derzeit kein

anerkanntes Regelwerk. In der ÖNORM B 4705 „Fertigteile aus Beton“ sind Schleuderbetonprodukte ausdrücklich ausgenommen. Je Bundesland ist daher für die Verwendung eine Österreichisch Technische Zulassung erforderlich, oder für jedes Bauorhaben ein Gutachten im Einzelfall zu erbringen. Um die mit den Gutachten verbundenen zusätzlichen Kosten respektive den administrativen Aufwand für neun Österreichische Technische Zulassungen zu vermeiden, wird im Zuge des Entwicklungsprojekts ein Regelwerk erarbeitet, das als Grundlage für eine künftige ÜA-Kennzeichnung dienen soll. Mit einem entsprechenden Konformitätsnachweis wäre die Brauchbarkeit und Verwendung von hochbewehrten Schleuderbetonstützen in allen Bundesländern einheitlich gegeben.

Das gewählte Versuchsprogramm soll in erster Linie zeigen, welche Tragfähigkeit und welches Verformungsverhalten hochbewehrte Schleuderbetonstützen aufweisen. Weiters soll der Einfluss der Querbewehrung bzw. der Ganghöhe bei hochbewehrten Schleuderbetonstützen auf die Tragfähigkeit, das Tragverhalten und die Verformbarkeit untersucht werden, weshalb neben der Traglast auch das Nachbruchverhalten von besonderem Interesse ist.

Bild 1: Längs- und Querschnitt des Prüfrahmens an der TU Wien mit Aufbau zur Prüfung von beidseitig gelenkig gelagerten Stützen mit einer Länge von 5,0 m.

Alle Fotos und Diagramme: Institut für Stahlbeton- und Massivbau

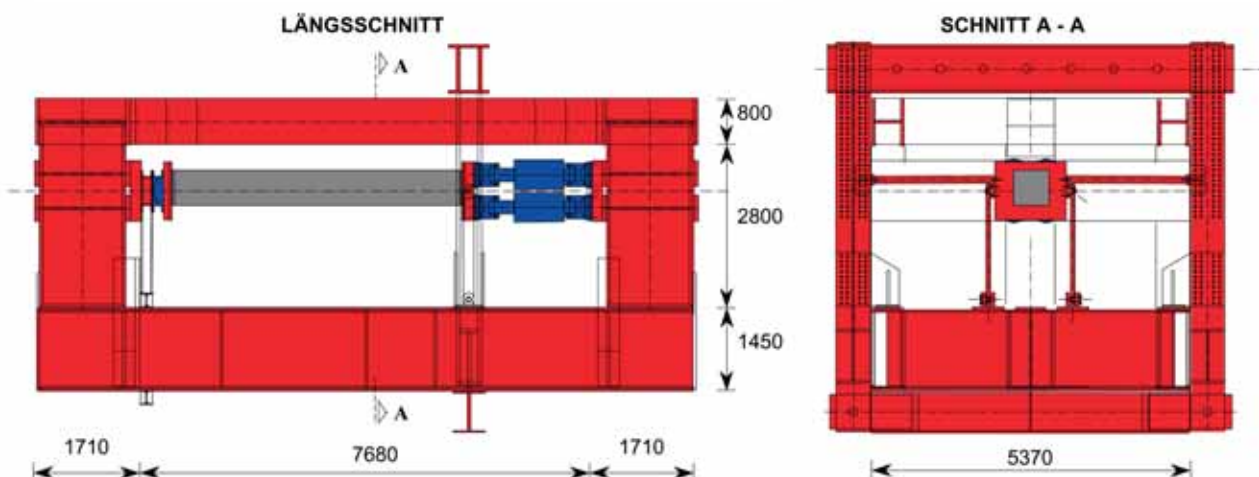




Bild 2: Ansicht vom Versuchsaufbau mit Hydraulikzylindern im Vordergrund, Druckplatte, Versuchskörper, Druckplatte mit Linienkipplager, Widerlagerbock und Distanzmodulen.

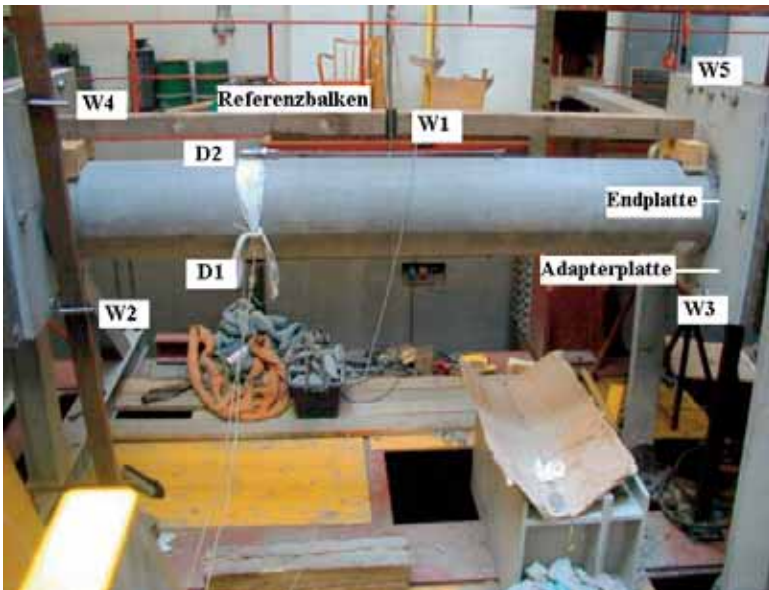


Bild 3: Darstellung der Wegmessstrecken der digitalen (D) und der induktiven (W) Wegaufnehmer.

### 3.2 Versuchsprogramm

Es wurden zahlreiche zerstörende Druckversuche an Schleuderbetonstützen an der TU Wien durchgeführt. Bei den Prüfserien wurden Querschnittsform (rund, quadratisch, oval), Querschnittsabmessungen, Länge der Stützen sowie Längs- und Querbewehrungsgrade variiert. Die Stützen hatten Längen von 2,0 bis 4,7 m, Durchmesser von 20 bis 45 cm, Bewehrungsgrade von 5 bis 22 % und auch unterschiedliche Querbewehrungsgrade.

Die Berechnungsmethoden von Stützen unter zentrischem Druck sind in den europäischen Normen unterschiedlich geregelt. In der ÖNORM B 4700 [2] müssen auch zentrisch gedrückte Stützen mit einer minimalen Exzentrizität von  $D/10$  berechnet werden. Deshalb wurden alle Stützen planmäßig exzentrisch mit  $e_0 = D/10$  bzw.  $D/5$  belastet. Die Ausmitte am Beginn des Versuchs ist die planmäßige Exzentrizität  $e_0$ , dazu kommt noch die ungewollte Exzentrizität  $e_a$ . In unserem Fall ist durch den exakten Einbau in den Rahmen  $e_a \approx 0$ . Die zusätzliche Auslenkung  $e_2$  entsteht durch die Stützenverformung bei Belastung. Das statische System entspricht einer Pendelstütze mit einer Normalkraft, die um  $e_0$  an beiden Enden verschoben ist.

### 3.3 Durchführung der Versuche

Eine für den Druckversuch vorbereitete Stütze mit einem Durchmesser von 40 cm und einer Länge von drei Metern wird in Bild 2 gezeigt. Die Stütze wurde frei drehbar in die Prüfeinrichtung eingebaut und mit einer vordefinierten Exzentrizität von  $D/10$  belastet. Die exakte Einhaltung der Exzentrizität wurde mit einer geschraubten Verbindung und massiven Endplatten gewährleistet, die auch gleichzeitig eine optimale Kräfteinleitung in den Prüfkörper sicherte (siehe auch Bild 3). Die Stützen wurden immer so eingebaut, dass das Versagen an der Stützenoberseite eintrat.

Die Lastaufbringung erfolgt mit einer konstanten Deformationsgeschwindigkeit von 0,2 mm/min. Durch die Wegsteuerung und

die hohe Steifigkeit des Prüfrahmens war es möglich, auch nach Überschreiten der Maximalkraft den Nachbruchbereich zu erfassen. Die Verschiebungen über die gesamte Prüfkörperlänge wurden mit 5 Wegaufnehmern (W1 bis W5) aufgezeichnet (siehe Bild 3). Daraus wurden die Längsstauchung, die Auslenkung in Stützenmitte und die Verdrehung der Endplatten berechnet. Die Stauchung an der Stützenoberseite und Stützenunterseite konnte mit 2 digitalen Wegaufnehmern (D1, D2) in Stützenmitte ermittelt werden. Die Kraft, die auf die Stütze wirkte, wurde aus den Öldrücken der einzelnen Hydraulikzylinder bestimmt und aufsummiert. Mit einer hochpräzisen Kraftmessdose wurde die Genauigkeit der Kraftmessung überprüft.

### 3.4 Ergebnisse aus den Versuchen

Kurz vor, jedoch spätestens bei Erreichen der maximalen Normalkraft  $N_{\max}$  bildeten sich Risse, die sich vornehmlich in Längsrichtung ausbreiteten. Bei weiterer Laststeigerung löste sich die Betondeckung teilweise schollenartig von der Wendelbewehrung der Stütze. Mit zunehmender Stauchung schritt die Schädigung des Betons fort und die aufnehmbare Kraft der Stütze sank kontinuierlich. Beim Reißen der ersten Wendelumwicklung folgten in kurzem Abstand die benachbarten Wendelgänge und das Totalversagen der Stütze trat ein. Die Duktilität nach Erreichen der Traglast konnte durch einen höheren Querbewehrungsgrad verbessert werden, dies ist an den Stützen der Serie A (Wendel  $\varnothing$  6/10), Serie B (Wendel  $\varnothing$  6/4) und Serie C (Wendel  $\varnothing$  6/20) in Bild 4 ersichtlich. Man sieht deutlich, dass die Last nach Erreichen der Maximallast bei gleicher Stützenstauchung stärker abfällt, wenn die Querbewehrung geringer ist. Weiters konnte die Stütze C2 mit geringer Querbewehrung auch weniger gestaucht werden. Neben der Duktilität konnte durch eine höhere Querbewehrung auch die Maximallast geringfügig gesteigert werden. Die Bruchbilder in Bild 5, 6 und 7 zeigen den Einfluss auf das Bruchbild der unterschiedlichen Querbewehrungen.

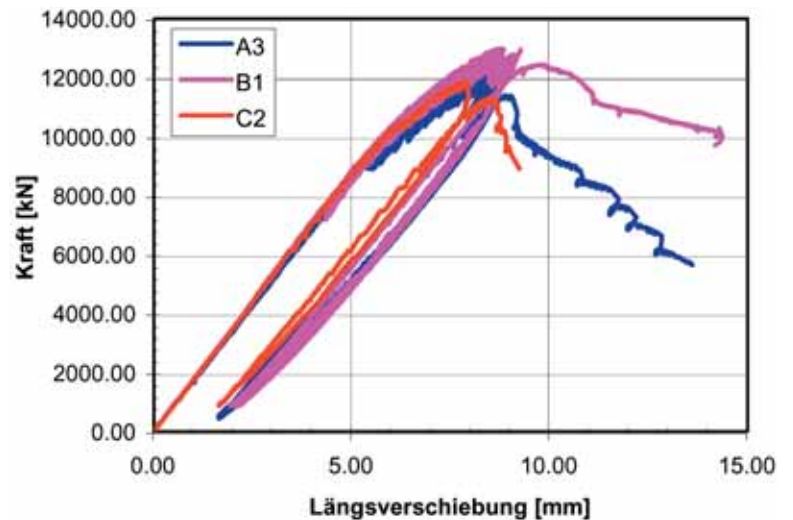


Bild 4: Kraft-Längsverschiebungsdiagramme von Stützen mit gleichem Längsbewehrungsgehalt, jedoch unterschiedlichem Querbewehrungsgehalt.

## 4 Bemessungskonzept

Die Berechnung der Schnittgrößen und der Auslenkungen erfolgt analog zu den Berechnungsvorschriften der ÖNORM B 4700 bzw. des Eurocode 2 für Stützen mit herkömmlichen Bewehrungsgraden. Ausgenommen davon ist nur die Bestimmung der Querschnittstragfähigkeit. Es werden auch die Arbeitslinien des Betons und des Stahls der ÖNORM B 4700 bzw. des Eurocode 2 verwendet. Mit ausgewählten Betonrezepturen wurden in den Versuchen höhere Stauchungen erreicht als in den beiden Normen vorgeschrieben. Diese höheren Stauchungen dürfen bei der Bestimmung der Querschnittstragfähigkeit berücksichtigt werden. Dies hat zur Folge, dass auch der eingelegte Stahl besser ausgenutzt werden kann.

Abweichend von den Normen muss für die Bestimmung der Querschnittstragfähigkeit der Nettoquerschnitt des Betons verwendet werden. Dies begründet sich darin, dass bedingt durch den hohen Bewehrungsgrad der Unterschied zwischen Brutto- und Nettoquerschnitt nicht mehr vernachlässigbar ist. Weiters ist für quadratische und ovale Stützenquerschnitte die Betondeckung abzuziehen.



Bild 5: Bruchbild der Stütze A3 mit einer Querbewehrung von ø 6/10 cm.



Bild 6: Bruchbild der Stütze B1 mit einer Querbewehrung von ø 6/4 cm.



Bild 7: Bruchbild der Stütze C1 mit einer Querbewehrung von ø 6/20 cm.

Auch für die Bestimmung der Bügel bzw. Wendelbewehrung würden die Normen hohe und ungünstige Stabdurchmesser bzw. Abstände vorschreiben. Die Menge der einzulegenden Querbewehrung wurde in den zerstörenden Bruchtests ermittelt und ist in die gutachterlichen Stellungnahmen eingeflossen.

### 5 Vergleich der experimentellen und berechneten Traglasten

Um das Bemessungsmodell zu verifizieren, wurden für alle Stützen die experimentellen mit den nach Bemessungsmodell ermittelten Traglasten verglichen. Da die Exzentrizität mit ansteigender Belastung zunimmt, eignen sich hierzu besonders Momenten-Normalkraft-Interaktionsdiagramme. Die Berechnung der Interaktionsdiagramme erfolgte mit dem Programm BK [3]. Es wurden Interaktionsdiagramme mit Mittelwerten aus begleitend durchgeführten Versuchen am Tag der Stützenprüfung und Bemessungswerten aus 28-Tage-Festigkeitswerten der ermittelten Betongüte B 60 nach ÖNORM B 4700 bzw. B 4710 [5] berechnet. Das verwendete konstitutive Modell für Beton unter Druckbeanspruchung ist das Parabel-Rechteck-Diagramm der ÖNORM B 4700 mit einer maximalen Betonstauchung von 3,5 Promille. Um die errechneten Traglasten mit den Versuchswerten zu vergleichen, wurden die Betonfestigkeiten an Prüfzylindern mit einem Durchmesser von 15 cm und einer Höhe von 30 cm am Tag der Stützenprüfung bestimmt.

Für die Diagramme in Bild 8 und 9 wurden aus den Zylinderfestigkeiten der unterschiedlichen Stützen Mittelwerte gebildet, damit die Versuchswerte miteinander verglichen werden können. Die mittleren Stahlfließfestigkeiten wurden nach CEB-FIB Model Code 90 [4] mit

$$f_{ym} = f_{yk} + 10 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

bestimmt. Zugversuche an zwei Längsbewehrungsstäben mit ø 40 mm und zwei

Längsbewehrungsstäben mit ø 50 mm haben gezeigt, dass der Mittelwert der Stahlfließfestigkeiten mit obiger Formel ( $f_{ym} = 560 \text{ N/mm}^2$ ) mit dem aus den Zugversuchen ( $f_{ym} = 573 \text{ N/mm}^2$ ) gut angenähert wird. Der Bemessungswert der Fließgrenze wurde der ÖNORM B 4700 entnommen. Die experimentell ermittelten Traglasten liegen für alle Versuche sehr nahe bei der mit Mittelwerten berechneten Interaktionslinie (siehe Bilder 8 und 9).

Man kann erkennen, dass die Stützen mit zunehmender Belastung von der planmäßigen Exzentrizität abweichen, aber nahe auf der mit Mittelwerten berechneten Versagenslinie liegen. Die Zunahme der Exzentrizität entspricht der Zusatzverformung aus der Theorie 2. Ordnung.

In Bild 8 werden die Prüfkörper A, B und C mit gleicher Längsbewehrung (Bewehrungsgrad 18 %), jedoch unterschiedlicher Querbewehrung verglichen. Man sieht hier deutlich den Einfluss der Querbewehrung. Je mehr Querbewehrung im Prüfkörper eingebaut wurde, umso höher war die Traglast. Die Prüfkörper der Serie C wiesen die geringste Querbewehrung auf. Es konnte festgestellt werden, dass die geringe Querbewehrung zu einer niedrigeren Traglast als in der Berechnung ermittelt führte. Das Versagen der Stütze trat mit wenig Vorankündigung und schlagartig ein (siehe auch Bilder 4, 5, 6 und 7). Um einen Vergleich zu Stützen mit üblichen Bewehrungsgraden herzustellen, wurden auch Stützen mit 5,1 % Bewehrungsgrad und unterschiedlicher Längsbewehrung getestet. Man sieht in Bild 8, dass sich mit den Berechnungsmodellen nach ÖNORM die Traglasten gut nachrechnen lassen. Man kann weiters erkennen, dass der Einfluss der Querbewehrung bei üblichen Bewehrungsgraden nicht so ausgeprägt und geringer als die Versuchsstreuung ist, da hier der Prüfkörper mit der geringeren Querbewehrung eine höhere Maximallast erreichte.

Weiters wurden auch Stützen mit Längsbewehrung in Doppellage getestet. Bei diesen

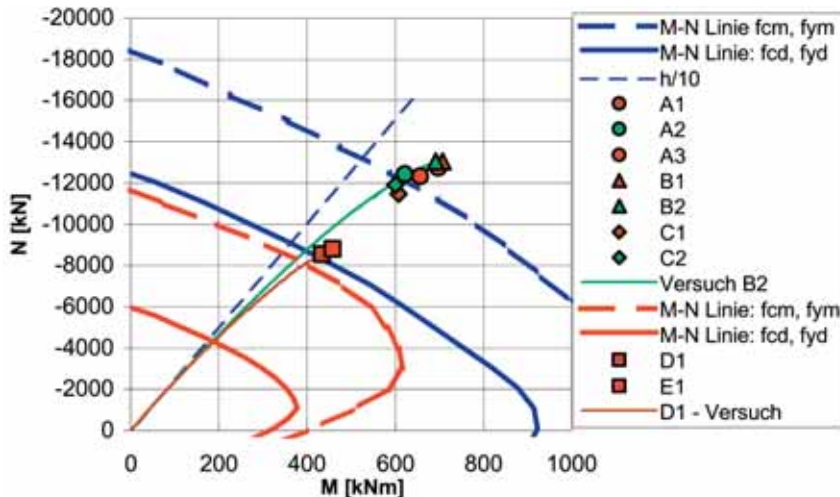


Bild 8: Momenten-Normalkraft-Interaktionsdiagramm für Stützen mit 40 cm Durchmesser. Bei den Prüfkörpern A, B, C sowie D und E wurde die Querbewehrung variiert.

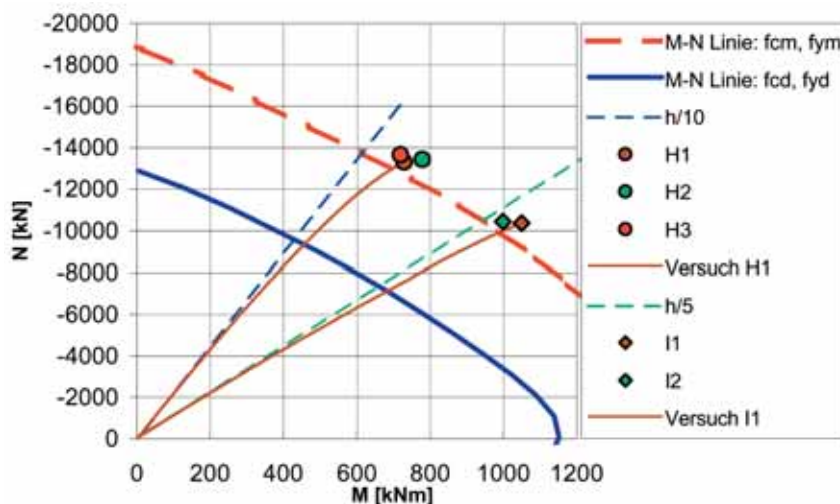


Bild 9: Momenten-Normalkraft-Interaktionsdiagramm für Stützen mit 45 cm Durchmesser. Die Prüfkörper der Serie H und I wurden mit unterschiedlichen Anfangsexzentrizitäten belastet.

Stützen wurde auch die Anfangsexzentrizität mit  $e_0 = D/10$  und  $e_0 = D/5$  variiert. Die Traglasten sind in Bild 9 eingetragen. Auch für größere Exzentrizitäten sind die Annahmen für die Berechnung erfüllt und die Traglasten liegen außerhalb der berechneten Momenten-Normalkraft-Interaktionslinie.

Zusätzlich wurden für alle berechneten Querschnitte die Momenten-Normalkraft-Interaktionsdiagramme für die Bemessungsfestigkeiten ermittelt. Aus dem Diagramm in

Bild 8 wird ersichtlich, dass mit hochbewehrten Schleuderbetonstützen mit 18 % Bewehrungsgrad die doppelte Tragfähigkeit gegenüber einer Stütze mit üblichem Bewehrungsgrad von 5,1 % bei gleichen Querschnittsabmessungen erreicht werden kann.

## 6 Literaturverzeichnis

- [1] Schwarz, L.: Neue Möglichkeiten der experimentellen Tragwerksuntersuchung an der Abteilung für Angewandte Modellstatik im Stahlbau der TU Wien, Stahlbau Rundschau, 68, 1987, 2–8.
- [2] ÖNORM B 4700: Stahlbetontragwerke, Eurocode-nahe Berechnung, Bemessung und konstruktive Durchbildung, Ausgabe 2001.
- [3] Ballo, M., Benko, V. et al.: System BK Stahlbetonkonstruktionen, Manual zu den Berechnungsprogrammen BK. Bratislava, 1991.
- [4] Comité Euro-International du Béton: CEB-FIB Model Code 1990, Thomas Telford Ltd., 1993.
- [5] ÖNORM 4710: Beton. Teil 1: Festlegung, Herstellung, Verwendung und Konformitätsnachweis, Ausgabe 2001-04-01.

## 7 Danksagung

Das Versuchsvorhaben an Schleuderbetonstützen wird von den Firmen MABA Fertigteilindustrie GmbH, Stoiser & Wolschner Umwelttechnik GmbH und SACAC Schleuderbetonwerk AG finanziert und vom Forschungsförderungsfond für die gewerbliche Wirtschaft unterstützt. Für die Mitarbeit bei den experimentellen Untersuchungen danken wir den Herren DI Herbert Pardatscher, DI Markus Brunner, DI Emmanuel Girod, DI Johann Horvatits, DI Matthias Tauber, DI Hannes Wegscheider und DI Martina Surmova.

*o.Univ.-Prof. DI Dr. Johann Kollegger und DI Dr. techn. Stefan L. Burtscher  
Technische Universität Wien,  
Institut für Stahlbeton- und Massivbau*