

Entwurf:

Die endgültige Version ist erschienen in:

Österreichische Ingenieur- und Architektenzeitschrift, Jg. 149, Heft 1/2004, S.11-16

Markus Intichar, Martin Ebner und Lutz Sparowitz

Umlenkkräfte in gekrümmten Stahlbetonbalken

DI Markus Intichar

VAss DI Martin Ebner, Institut für Betonbau, TU Graz

Prof. DI Dr. techn. Lutz Sparowitz, Institut für Betonbau, TU Graz

1 Einleitung

Zum Thema „Tragfähigkeit von gekrümmten Balken ohne explizite Bewehrung für Umlenkkräfte“ wurden im Rahmen einer Diplomarbeit [1] am Institut für Betonbau der Technischen Universität Graz sowohl theoretische Überlegungen angestellt, als auch Versuche an der Konstruktiven Versuchsanstalt (KVA) durchgeführt. Es wurde versucht, die Abnahme der Tragfähigkeit zu ermitteln, welche bei der Überlagerung von Spannungen aus Umlenkkräften und aus Verbundwirkungen eintritt. Sowohl Umlenkkräfte als auch Verbundspannungen verursachen Betonzugspannungen normal zur Betonoberfläche. Wenn die Summe dieser Zugspannungen die Betonzugfestigkeit erreicht, kommt es zum Abplatzen der Betondeckung gemeinsam mit der Bewehrung. Durch den Vergleich mit der derzeit gültigen ÖNORM B4700 [2] sollte gezeigt werden, ob die gewonnenen Erkenntnisse durch die Normen Regelung zufriedenstellend abgedeckt werden können.

2 Umlenkspannungen

Bei Stahlbetonbalken mit gekrümmter oder geknickter Stabachse treten Umlenkkräfte sowohl im Biegedruckgurt als auch im

Biegezuggurt auf, wenn die jeweiligen Bewehrungsstäbe eine Längskraft (Druck- oder Zugkraft) erfahren. Die Größe der Umlenkkräfte ergibt sich mit Hilfe der „Kesselformel“ wie in Abb. 1 ersichtlich.

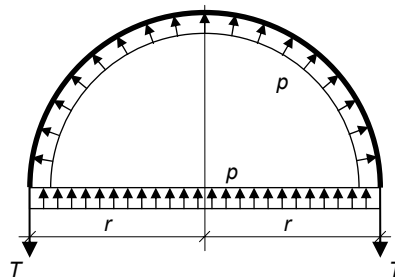


Abb. 1: Kesselformel

$$T = p \cdot r \quad \text{Gl. 1}$$

p Kessellinnendruck
 r Radius
 T Ringkraft

Auf den in Abb. 2 betrachteten gekrümmten Stahlbetonträger angewandt, ergeben sich die Umlenkkräfte in den Gurten zu

$$u_s = \frac{T_s}{r_s} = \frac{A_s \cdot \sigma_s(\epsilon_s)}{r_s} \quad \text{Gl. 2}$$

für die innere Bewehrungslage und

$$u_c = \frac{C_c}{r_c} \quad \text{Gl. 3}$$

für den Druckgurt. Wenn das einwirkende Biegemoment wie in Abb. 2 auf der konkaven „Innenseite“ des Balkens Zugspannungen erzeugt, liegt die

Biegezugbewehrung an der Bogeninnenseite –nahe der Betonoberfläche.

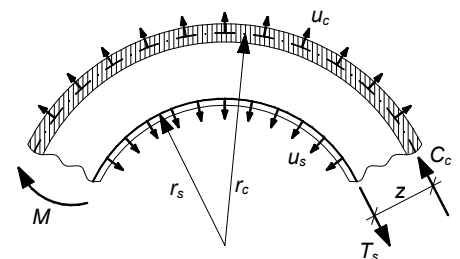


Abb. 2: Umlenkkräfte

Die Umlenkkräfte u_s an der Bewehrung sind mit den Umlenkkräften u_c zu verschließen. Wenn hierfür keine Bügelbewehrung (Umlenkbewehrung) vorgesehen wird, müssen diese Umlenkkräfte mittels Betonzugspannungen σ_z übertragen werden (Abb. 3).

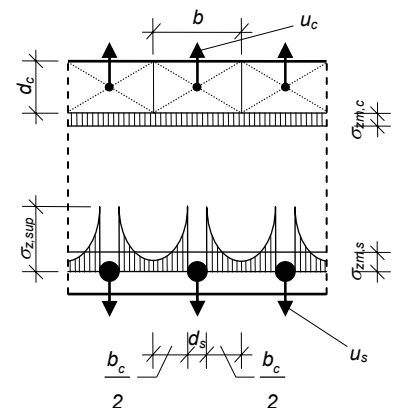


Abb. 3: Querschnitt des gekrümmten Balkens: Betonzugspannungen σ_z

Entwurf:

Die endgültige Version ist erschienen in:

Österreichische Ingenieur- und Architektenzeitschrift, Jg. 149, Heft 1/2004, S.11-16

Es gilt:

$$\sigma_{zm,c} = \frac{u_c}{b}$$

$$\sigma_{zm,s} = \frac{u_s}{b_c} > \sigma_{zm,c}$$

Durch die Lochleibungswirkung entstehen zwischen den Bewehrungen die größten Zugspannungen mit theoretischen Spannungsspitzen am Rand des Biegebewehrungsstabes

$$\sigma_{z,sup} = k \cdot \sigma_{zm,s} = k \cdot \frac{u_s}{b_c} \quad \text{Gl. 4}$$

Wenn $\sigma_{z,sup}$ die Betonzugfestigkeit überschreitet, kommt es zu einem gemeinsamen Abplatzen der Bewehrung und der Betondeckung (Abb. 4).

Der Bruch tritt dabei vorwarnungslos und plötzlich, also spröde ein.

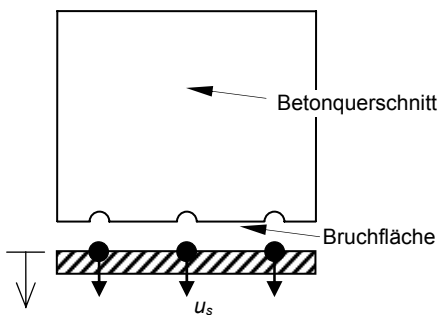


Abb. 4: Bruchbild beim Abplatzen (schematisch)

Um gegen diesen Spröbruch einen entsprechenden Sicherheitsabstand zu erreichen, muss der Bemessungswert für die Betonzugfestigkeit vorsichtig angesetzt werden:

$$f_{ct,d} = \frac{f_{ctk,0,05}}{\gamma_c} \quad \text{Gl. 5}$$

$f_{ct,d}$ Designwert für die Betonzugfestigkeit

$f_{ctk,0,05}$ 5 %-Fraktilwert der Betonzugfestigkeit
 γ_c Sicherheitsbeiwert ($\gamma_c = 2,0$)

Wenn man die Gl. 5 mit der Gl. 4 gleichsetzt, erhält man den Bemessungswert für die vom Beton allein aufnehmbare Umlenkraft:

$$u_{s,Rd} = \frac{f_{ct,d} \cdot b_c}{k} \quad \text{Gl. 6}$$

Für $k = 3$ ergibt sich daraus:

$$u_{s,Rd} = \frac{f_{ctk,0,05} \cdot b_c}{6} \quad \text{Gl. 7}$$

Die Gl. 2 liefert die größtmögliche Umlenkraft $u_{s,Sd}$ die aus der gekrümmten Bewehrung entstehen kann.

$$u_{s,Sd} = \frac{A_s \cdot f_{yd,sup}}{r_s} \quad \text{Gl. 8}$$

$$f_{yd,sup} = f_{yk,0,95} \cdot \gamma_s \quad \text{Gl. 9}$$

mit $\gamma_s = 1,15$.

Für die rechnerische Festigkeit der Bewehrung ist in diesem Falle ein oberer Grenzwert $f_{yd,sup}$ anzusetzen, um sicher zu stellen, dass das Fließen der Bewehrung eintritt, bevor der Bruch durch Abplatzen der Betondeckung erfolgt (\equiv duktiles Systemverhalten). Die Bedingung hierfür lautet:

$$u_{s,Sd} \leq u_{s,Rd} \quad \text{Gl. 10}$$

3 Versuche

Zur experimentellen Überprüfung der im Abschnitt 2 beschriebenen theoretischen Überlegungen wurden

zwölf Versuchsträger mit den in Abb. 5 dargestellten Abmessungen hergestellt.

Die Betongüte wurde mit B20/B225/GK16/K3 festgelegt. Als Bewehrungsstahl ist der handelsübliche BSt550 verwendet worden.

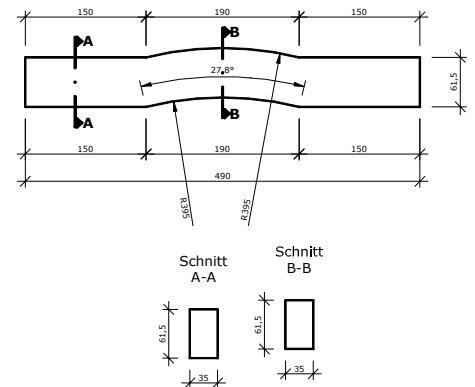


Abb. 5: Abmessungen der Versuchskörper

Die Belastung des statisch bestimmt gelagerten Einfeldbalkens erfolgte zuerst durch zwei symmetrische Einzellasten (Abb. 6), wodurch im Bereich des Bogens bei Vernachlässigung des Eigengewichtes keine Querkraft – also ein konstanter Biegemomentenverlauf – gegeben war.

Entwurf:

Die endgültige Version ist erschienen in:
Österreichische Ingenieur- und Architektenzeitschrift, Jg. 149, Heft 1/2004, S.11-16

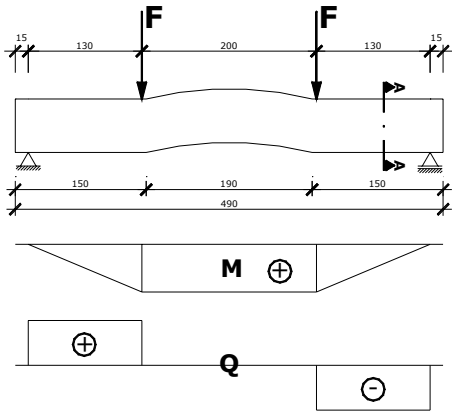


Abb. 6: Versuchsanordnung symmetrisch

Um den Einfluss der Querkraft experimentell zu verifizieren, wurde auch eine einseitige Lastanordnung untersucht (Abb. 7).

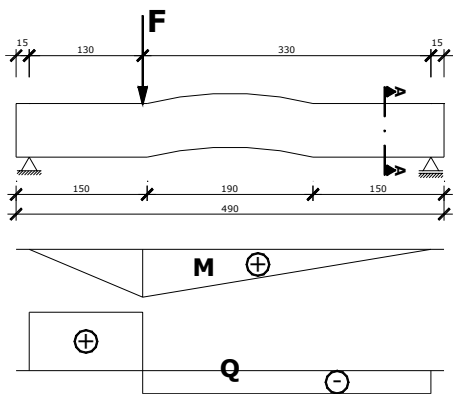


Abb. 7: Versuchsanordnung einseitig

Abb. 8 zeigt die Bewehrungsführung in den Versuchsbalken. Es wurden vier verschiedene Trägertypen mit unterschiedlicher Bewehrungsanordnung miteinander verglichen.

Die Bügelbewehrung (Abb. 8, Pos. 3 und 4: $\varnothing 10/10$) und die obere Längsbewehrung (

Abb. 8, Pos. 2: $6\varnothing 12$) wurden bei allen Trägern gleich ausgebildet. Die Gesamtquerschnittsfläche der Biegezugbewehrung (Abb. 8, Pos. 1) ist mit $8\varnothing 16$ ebenfalls bei allen Trägern identisch.

Im Bereich der Krümmung wurde im Biegezugbereich auf die notwendige Verbügelung verzichtet, um hier das gezielte Abplatzen der Betondeckung zu ermöglichen. Die Bügelbewehrung der Übergangsbereiche (Knick in der Unterkante der Träger sowie Lasteinleitungszone) wurde angeordnet, um ein unvorhergesehenes, lokales Versagen in diesen Problemzonen auszuschließen.

Die Umschnürung der Druckzone mit kleinen Bügeln verhinderte ein frühzeitiges Druckversagen. Die Bewehrungsstäbe bei Typ A waren gleichmäßig über die Breite verteilt. In den Trägern des Typs B waren vier Zweierbündel angeordnet, und in Typ C wurden zwei Viererbündel als Biegezugbewehrung angeordnet (siehe

Entwurf:

Die endgültige Version ist erschienen in:

Österreichische Ingenieur- und Architektenzeitschrift, Jg. 149, Heft 1/2004, S.11-16

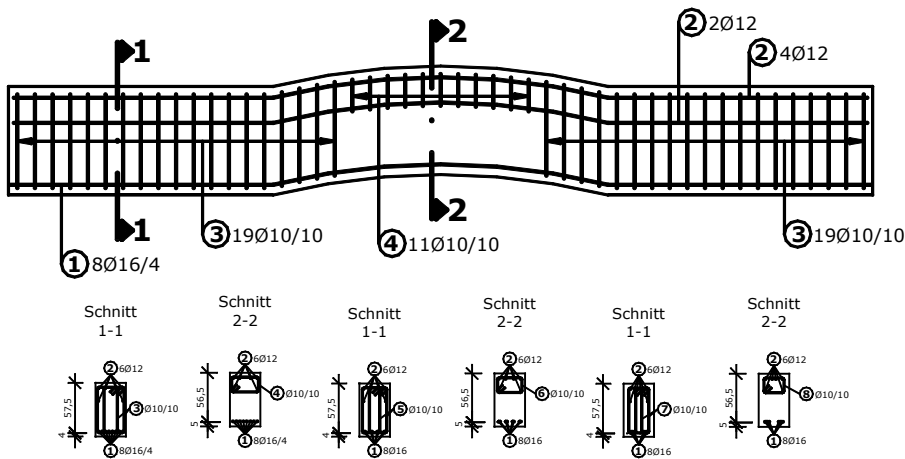


Abb. 8: Bewehrungsskizze der Versuchskörper

Abb. 8). Zusätzlich wurde je Typ ein Träger mit Querstäben unter der Biegezugbewehrung ausgestattet, erkennbar am Index q. Die Versuchsdurchführung erfolgte mit einer 1000 kN-Prüfanlage und servohydraulisch gesteuertem Prüfzylinder. Die Belastungssteigerung erfolgte weggesteuert, d.h. unter linearer Zunahme der Verformung mit der Zeit, wodurch im Traglast- bzw. im Abplatzlastbereich sehr gut das Verhalten der Träger studiert werden konnte.

Gemessen wurden bei allen Trägern die Durchbiegungen in Trägermitte mittels Seilextensometer, die Belastung sowie der Kolbenweg. Weiters versuchte man die Relativverschiebung zwischen der Betondeckung unter der Zugbewehrung und der Druckzone zu erfassen.

Die Versuche wurden jeweils nach dem Abplatzen der Betondeckung abgebrochen.

Die Träger A3 (symmetrisch belastet) und Cq (einseitig belastet) wurden bis zum Biegeversagen weiterbelastet um Informationen über das



Abb. 9: Bruchform nach Erreichen der Abplatzlast

Nachbruchverhalten (mit bereits abgeplatzter Betondeckung) zu erhalten.

4 Versuchsergebnisse

Abb. 9 zeigt das typische Bruchbild dieser Versuchsserie. Bei Erreichen der Abplatzlast brach die Zugbewehrung gemeinsam mit der darunter liegenden Betondeckung schlagartig ab. Die Untersicht wurde dabei praktisch nicht zerstört. Dies gilt für alle Trägertypen, unabhängig von der Bewehrungsanordnung!

Entwurf:

Die endgültige Version ist erschienen in:

Österreichische Ingenieur- und Architektenzeitschrift, Jg. 149, Heft 1/2004, S.11-16

Es zeigte sich weiters, dass die Bewehrungsanordnung einen gewissen Einfluss auf die Abplatzlast hat, tendenziell trägt Typ A die höchsten Lasten, Typ C bricht bei den geringsten Belastungen und Typ B ist dazwischen angesiedelt (siehe Tab. 1). Wesentlich höheren Einfluss auf die erreichbare Abplatzlast scheint aber die Zugfestigkeit des Betons haben.

Eine Abschätzung der tatsächlichen Zugfestigkeit erfolgte im Rahmen von Nebenversuchen. Anhand von Würfelproben wurden die Spaltzugfestigkeiten ermittelt, daraus würde nach Model Code 90 (MC 90) [3] die Zugfestigkeit errechnet. Aus vielen, in der KVA durchgeführten Versuchen, konnte man immer wieder feststellen, dass die Zugfestigkeit sogar innerhalb einer Mischung beträchtlich schwanken kann (siehe dazu z.B. Neuner/Stöckl [4]: Hier lag die Streuung der Zugfestigkeit im Bereich von 25 %).

Die Wirkung der Querstäbe (unter der Hauptbewehrung liegend) konnte innerhalb dieser Versuchsserie nicht

verifiziert werden.

Der bis zur Biegetraglast belastete Träger A3 zeigte zunächst ebenfalls die beschriebene Bruchcharakteristik. Bei einer fortgesetzten Belastung lässt sich das statische System „Bogen mit Zugband“ beobachten. Schließlich stellt sich ein Versagen des Druckgurtes ein, gut beobachtbar durch ein lokales Ausknicken der Druckbewehrung zwischen den Bügelstäben und der damit verbundenen Zerstörung der Druckzone (siehe Abb. 10).

Die Biegetraglast stellte sich mit 651 kN nahe an der rechnerisch ermittelten Traglast von 668 kN ein (nach ÖNORM B4700 [2] unter Ansatz des Spannungsblockes und der tatsächlich aufgetretenen Festigkeitswerte).

Der Träger Cq, welcher einseitig belastet wurde, erreichte eine deutlich geringere Abplatzlast als die symmetrisch belasteten Träger (siehe Tab. 1). Dies lässt darauf schließen, dass die Querkraft einen erheblichen Einfluss auf die Größe der



Abb. 10: Bild der Zerstörung Träger A3

aufnehmbaren Abplatzlast hat. Da innerhalb der Versuchsserie leider an nur einem Träger diese Wirkung untersucht werden konnte, ist eine wissenschaftliche Aussage noch nicht möglich. Nähere Untersuchungen in Bezug auf die Interaktion zwischen Querkraft und Umlenkraft sind daher noch durchzuführen.

Das Bruchbild beim Abplatzen ist ähnlich dem der symmetrisch belasteten Träger.

Die Abb. 11 zeigt das Bruchbild von Träger Cq bei Erreichen der Biegetraglast. Man erkennt, dass auch die Betondeckung der Druckzone infolge der zusätzlichen Querkraft abplatzt. Dies geschah bei einer Belastung von

Tab. 1: Ergebnisse der Versuchsträger

Entwurf:

Die endgültige Version ist erschienen in:

Österreichische Ingenieur- und Architektenzeitschrift, Jg. 149, Heft 1/2004, S.11-16



Abb. 11: Bruchbild von Träger Cq bei Erreichen der Biegetraglast

290 kN (Wiederbelastung nach dem Abplatzen der Zugzone), danach konnte die Last noch bis zur Biegetraglast von 530 kN gesteigert werden.

5 Vergleich mit der ÖNORM und Schlussbetrachtung

Wie bereits erwähnt, wurden die gewonnenen Erkenntnisse mit den Formeln der ÖNORM B4700 [2] verglichen.

Das Hauptaugenmerk liegt dabei auf der bestehenden Bemessungsformel:

$$\sigma_{ctd} = 3 \cdot \frac{A_{s,vorh} \cdot f_{yk}}{b_c \cdot r_s} \leq \frac{f_{ctk}}{2,0} \quad \text{Gl. 11}$$

Aus den Versuchen wurde der Spitzenspannungserhöhungsfaktor κ (dieser Faktor entspricht dem Wert „3“ in der ÖNorm) mit den tatsächlich aufgetretenen Festigkeiten zurückgerechnet. Dabei traten Werte auf, die deutlich höher sind als 3,0 (siehe Tab. 1). Daraus resultiert der

Vorschlag den Erhöhungsfaktor κ auf mindestens 3,5 zu erhöhen.

Eine weitere Verbesserung könnte darin bestehen, Spannungen aus Aufhängelasten sowie Spannungen aus Querkräften bzw. Zugkraftänderungen im Stahl, die den Beton in Abplatzrichtung zusätzlich beanspruchen, in die Bemessung zu integrieren. Bisher wird dies lediglich in einem Satz erwähnt. Dies könnte auf folgende Weise geschehen:

$$\sigma_z = \sigma_{z,u} + \sigma_{z,b} + \sigma_{z,f} \leq \frac{f_{ctk,0,05}}{2,0} \quad \text{Gl. 12}$$

$$\sigma_{z,u} = \kappa \cdot \frac{A_{s,vorh} \cdot f_{yk,0,95} \cdot \gamma_s}{b_c \cdot r_s} \quad \text{Gl. 13}$$

$$\sigma_{z,b} = \lambda \cdot \frac{V}{z \cdot b_c} \quad \text{Gl. 14}$$

oder
$$\sigma_{z,b} = \frac{\Delta T_s}{\Delta x \cdot b_c} \quad \text{Gl. 15}$$

$$\sigma_{z,f} = \frac{\Sigma F}{a \cdot b_c} \quad \text{Gl. 16}$$

σ_z Betonzugspannungen in
Richtung der Umlenkkräfte

$\sigma_{z,u}$	Betonzugspannungen infolge von Umlenkkräften
$\sigma_{z,b}$	Betonzugspannungen infolge von Verbundwirkungen (Querkräfte)
$\sigma_{z,f}$	Betonzugspannungen infolge von an der Betonoberfläche aufgehängten Lasten (Dübel)
κ	Beiwert, der die Spannungsspitze infolge Lochleibungswirkung im Beton erfasst ($\approx 3,5$)
$A_{s,vorh}$	die tatsächlich eingebaute Querschnittsfläche der Bewehrung (meist etwas größer, als die statisch erforderliche)
$f_{yk,0,95}$	95 % Fraktile der Fließspannung
γ_s	Sicherheitsbeiwert für den Bewehrungsstahl (= 1,15)
λ	Beiwert zur Umrechnung einer Betonschubspannung in eine Normalspannung σ_z ($\lambda \approx 0,5$)
V	Querkraft
z	innerer Hebelarm
b_c	wirksame Betonquerschnittsbreite (zwischen der Zugbewehrung)
ΔT_s	Zugkraftänderung in der Biegezugbewehrung entlang einer Strecke Δx
F	aufgehängte Lasten
a	Länge auf die sich die aufgehängten Lasten verteilen

Für $\sigma_{z,b}$ gilt die Annahme eines Druckstrebenwinkels Θ von 45° .

Zur Ermittlung der Umlenkspannung $\sigma_{z,u}$ sollte eine obere Schranke für die Stahlfließspannung eingesetzt werden (Gl. 9), um die theoretisch maximal auftretende Kraft im Bewehrungsstahl zu berücksichtigen.

Abschließend sei nochmals darauf hingewiesen, dass bei Bemessungsaufgaben, wo die Betonzugfestigkeit eine tragende

Entwurf:

Die endgültige Version ist erschienen in:

Österreichische Ingenieur- und Architektenzeitschrift, Jg. 149, Heft 1/2004, S.11-16

Rolle spielt, eine entsprechende Sorgfalt anzuwenden ist.

6 Literaturangaben

- [1] Intichar, Markus: „Untersuchung der Interaktion zwischen Verbundspannungen und Umlenkspannungen“, Diplomarbeit an der Technischen Universität Graz, September 2002.
- [2] Fachnormenausschuß 010 Beton-, Stahlbeton- und Massivbau: „ÖNORM B4700, Stahlbetontragwerke EUROCODE-nahe Berechnung, Bemessung und konstruktive Durchbildung“, Ausgabe 2001-06-01, ICS 91.080.40
- [3] Comite Euro-International du Beton: „CEB – FIP Model Code 1990, Design Code“, Verlag Thomas Telford, Lausanne 1993, ISBN 0 7277 1696 4
- [4] J. Neuner und S. Stöckl: „Versuche zur Aufnahme der Umlenkkräfte von gekrümmten Bewehrungsstäben durch Betondeckung und Bügel“, in DEUTSCHER AUSSCHUSS FÜR STAHLBETON, Heft 322, Verlag Wilhelm Ernst und Sohn, Berlin 1981, ISBN 3-433-00922-8