

Sandra Ofner / Norbert Randl

# Numerische Simulation nachträglicher Verstärkung von Tragwerken auf Querkraft

127 - Life-Cycle-Engineering im konstruktiven Ingenieurbau und  
Hochbau

## Abstract

Aufgrund der sich ändernden Normenlage im Betonbau und einhergehenden Anpassungen bei den Bemessungsvorgaben bei gleichzeitig zunehmender Verkehrsbelastung kann es notwendig werden, bereits bestehende Bauwerke, insbesondere im Zuge von ohnedies stattfindenden Sanierungsmaßnahmen und Generalertüchtigungen, auch auf Querkraft zu verstärken. Diese nachträgliche Verstärkung des Systems kann gegenüber einer Abbruch- und Neubaumaßnahme nicht nur wirtschaftliche Vorteile aufweisen, sondern bei einer derart schonenden Verlängerung des Lebenszyklus auch ökologische Gesichtspunkte besser bedienen. Im gegenständlichen Beitrag werden Stahlbetonbalken mit und ohne nachträglich schräg eingemörtelte/r Bewehrung zur Querkraftverstärkung, die im Rahmen eines bereits abgeschlossenen Forschungsprojekts experimentell untersucht worden waren (Randl / Kunz 2009), mit Hilfe des FE-Programms ATENA simuliert. Die Modellierung des Werkstoffes Beton ist auch mit der Betrachtung des Einflusses der Bruchenergie auf das System verknüpft. Hierbei wurde dieselbe mit unterschiedlichen Ansätzen nach aktuellem Stand der Forschung berechnet und in das System eingebracht. Die Einbettung der Hauptlängsbewehrung erfolgte mittels starren Verbunds. Die nachträglich schräg eingebrachten Bewehrungsstäbe mit Hybridkleber wurden mittels Verbundmodell nach Model Code in das System implementiert. Bei der Verstärkungsvariante mit Epoxidkleber musste dieser mit zusätzlichen Elementen zur Erfassung der Verfestigung des umgebenden Betons modelliert werden. Wie die Ergebnisse zeigen, kann mit Hilfe des FE-Programmes ATENA das Querkraftversagen weitestgehend treffsicher und auch vom sich ergebenden Rissbild her realistisch abgebildet werden.

## Keywords:

Ertüchtigung, Tragwerksverstärkung, Querkraftversagen, numerische Simulation, Bruchenergie

## 1. Einleitung

Bei Nachrechnung bestehender Brückentragwerke aus Stahl- oder Spannbeton zeigen sich häufig Defizite in der rechnerischen Querkrafttragfähigkeit, die im Extremfall auch eine nachträgliche Verstärkung auf Querkraft nach sich ziehen können. Diese nachträgliche Verstärkung des Systems kann gegenüber einer Abbruch- und Neubaumaßnahme nicht nur wirtschaftliche Vorteile aufweisen, sondern bei einer derart schonenden Verlängerung des Lebenszyklus auch ökologische Gesichtspunkte besser berücksichtigen.

Bis heute ist die Normenlage im Zusammenhang mit der Bemessung auf Querkraft nicht harmonisiert. Hintergrund ist die Komplexität des Querkraftversagens bei gleichzeitig immer genauerer Erfassung

der Bruchvorgänge in experimentellen Untersuchungen. Da bei einer nachträglichen Querkraftverstärkung die Komplexität der Wirkkomponenten weiter zunimmt, kommt einer realitätsnahen numerischen Simulation derartiger Aufgabenstellungen immer größere Bedeutung zu.

## 2. Versuchsbasis für die numerische Simulation

Die mittels FE-Modell zu simulierenden Bauteilversuche wurden von der Hilti AG durchgeführt und an der Fachhochschule Kärnten ausgewertet (Randl / Kunz 2009). Hierbei handelt es sich um zehn Betonbalken, wovon acht mit nachträglich eingemörtelten Bewehrungsstäben hinsichtlich ihres Querkraftwiderstandes verstärkt wurden (siehe Abb. 1).

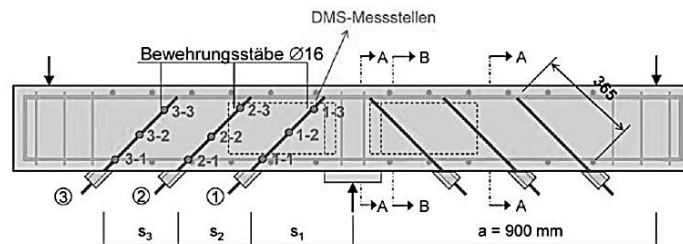
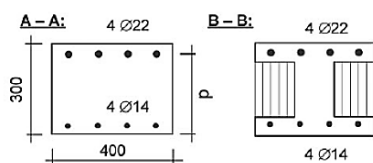


Abb. 1: Längsschnitt mit Anordnung der nachträglichen Bewehrungsstäbe (Randl / Kunz 2009)



Balken Nr.	Anzahl Schrägstäbe <sup>1)</sup>	Schrägstäbe mit je 3 DMS	s <sub>1</sub> [cm]	s <sub>2</sub> [cm]	s <sub>3</sub> [cm]	Mörtel <sup>4)</sup>
1	0	-	-	-	-	-
2	6 (2x3)	3	35,6	25,6	25,6	hyb
3	6 (2x3)	3	35,6	25,6	25,6	hyb
4	6 (2x3)	3	35,6	25,6	25,6	ep b
5	6 (2x3)	3	35,6	25,6	25,6	ep b
6	4 (2x2)	4	35,6	38,4	-	hyb
7	4 (2x2)	4	35,6	38,4	-	ep b
8	6 (2x3)	0 <sup>2)</sup>	35,6	27,6	23,6	hyb
9	4 (2x2)	1 <sup>3)</sup>	35,6	25,6	-	hyb
10	0	-	-	-	-	-

<sup>1)</sup> nachträglich installierte Querkraftbewehrung, D=16mm, 45°-Neigung

<sup>2)</sup> Querkraftbewehrung zusätzlich an der Balkenoberseite an starre Ankerplatten angeschweißt

<sup>3)</sup> innerster Bewehrungsstab Nr. 1

<sup>4)</sup> hyb = hybrid, d. h. sowohl Zement- als auch Kunststoffanteile, ep b = epoxybasiert

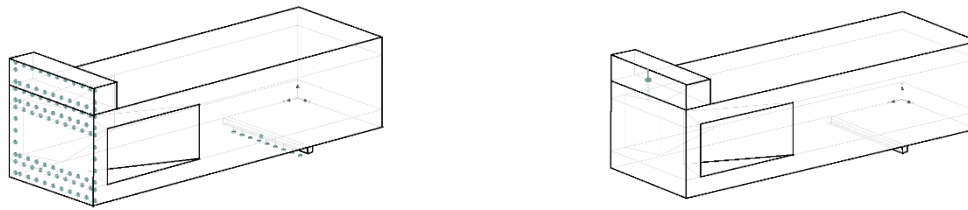
Abb. 2: Links: Schnitte durch das System (Randl / Kunz); rechts: Versuchsprogramm (Randl / Kunz 2009)

Die Betonbalken wurden in Balkenmitte auf einen I-Querschnitt mit 12cm Stegbreite reduziert, welches ein Querkraftversagen (das dann auch stets eintrat) begünstigen sollte (siehe Abb. 2 links). Die Anzahl und Anordnung der geeigneten Bewehrungsstäbe sowie der Verbundmörtel wurden variiert (siehe Abb. 2 rechts).

## 3. Modellierung mit dem FE-Programm ATENA

Da die Referenzbalken eine Symmetrie aufweisen, wurden sie in ATENA nur zur Hälfte modelliert. Hierbei wurde die nicht modellierte Hälfte an der Symmetrieffläche mittels Auflagerpunkten simuliert, welche das System in Längsrichtung festhalten. Zusätzlich wird der Balken auf einem Linienlager in vertikaler und horizontaler Richtung (entlang der Breitseite) gehalten (siehe Abb. 3 links). Die

Lasteinleitung erfolgte punktförmig, da dies eine bessere Aufzeichnung des Lasteintrags in die Struktur ermöglicht (siehe Abb. 3 rechts). Die Durchbiegung wurde in Balkenmitte gemessen.

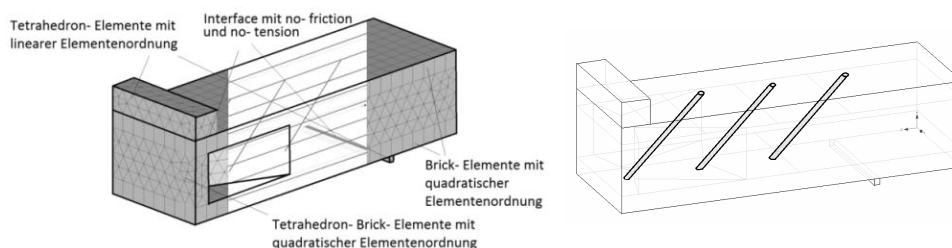


**Abb. 3: Links: Systemlagerungen; rechts: punktförmige Lasteinleitung in Balkenmitte**

Die Modellierung des Werkstoffes Beton wurde mit „Tetrahedron-brick“-Elementen (Červenka et al. 2013) durchgeführt, welche im Gegensatz zu den Elementen der Auflager- und Lasteinleitungspunkte mit einer höheren Elementordnung (mehr Integrationspunkte) belegt wurden (siehe Abb. 4). Die Elementgröße wurde nach (Belletti 2013) auf 5 cm festgelegt.

Die Schnittstellen (Interfaces) zwischen den einzelnen Makroelementen sowie auch zwischen dem Beton und den Auflager- bzw. Lasteinleitungsplatten wurden ohne Reibung und ohne Zugübertragung ausgeführt (siehe ebenfalls Abb. 4 links).

Die Hauptlängsbewehrung wurde diskret modelliert und mittels „perfect bond“, also einem starren Verbund, welcher keinen Schlupf zulässt, eingebettet, da mit einem Verbund-Schlupf-Gesetz nach Model Code das Modell zu duktil abgebildet und die Umlagerung der Kräfte im System auf die Verstärkungselemente nicht ausgenutzt wurde. Die nachträglich schräg eingemörtelten Bewehrungsstäbe wurden bei der mit Hybridkleber ausgeführten Variante mittels eines Verbundmodells nach (Model Code 90 1993) im System implementiert. Hierfür wurden repräsentative Werte aus früheren Auszugsversuchen (Randl / Kunz 2014) herangezogen und auf die Verbundspannung zurückgerechnet. Bei der mit Epoxidharzkleber ausgeführten Variante wurde der Verbundkleber als zusätzliches Element (siehe Abb. 4 rechts) berücksichtigt, um auch die Verfestigung des unmittelbar angrenzenden Betons durch den Kleber erfassen zu können.



**Abb. 4: Links: FE- Modell mit den wesentlichen Bestandteilen und Modellierungsansätzen; rechts: zusätzliche Elemente bei der mit Epoxidharzkleber verstärkten Variante.**

### 3.1 Materialparameter und Werkstoffgesetze

Für den verwendeten Beton wurde im Zugbereich ein „Exponential-Softening-Model“ und im Druckbereich ein „Parabolic-Model“ angewandt (Červenka et al. 2002). Die Materialkenndaten wurden aus (Randl / Kunz 2009) entnommen und in das Programm eingespielt. Die mittlere Würfelbetonfestigkeit  $f_{cm,cube}$  wurde mit  $45 \text{ N/mm}^2$  berücksichtigt, woraus sich die dazugehörige

Zylinderdruckfestigkeit  $f_{cm}$  mit  $35 \text{ N/mm}^2$  ergibt. Die Zugfestigkeit  $f_{ctm}$  wurde nach EN 1992- 1-1 mit  $3,3 \text{ N/mm}^2$  angesetzt.

Für die Bewehrungsstäbe wurde ein „Elasto-Plastic-Model“ mit Wiederverfestigung angewandt, um die tatsächliche Arbeitslinie realistisch abzubilden.

Die Fließgrenze  $f_{ym}$  des Bewehrungsstahls der Güte 500 B wurde mit  $550 \text{ N/mm}^2$  angenommen, welche mit dem Wiederverfestigungsfaktor von 1,08 zu einer Zugfestigkeit von  $594 \text{ N/mm}^2$  führte. Der E-Modul wurde nach (Randl / Kunz 2009) mit  $206000 \text{ N/mm}^2$  angesetzt.

### 3.2 Bruchenergie

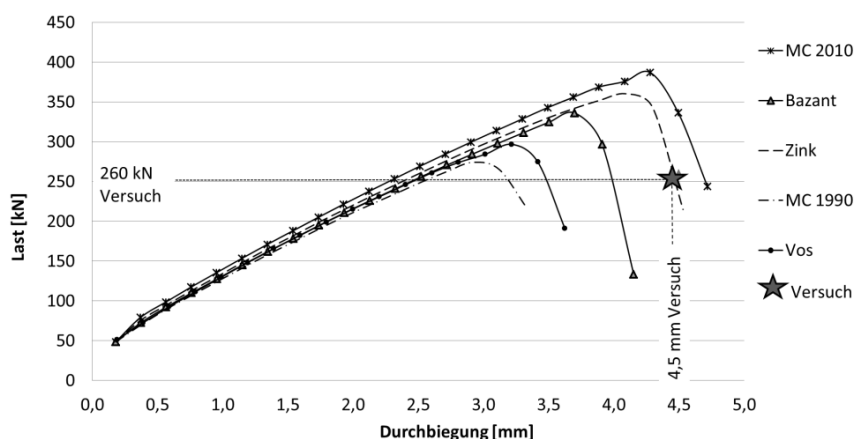
Beim Material Beton wurde die Bruchenergie, welche die Energie widerspiegelt, die erforderlich ist, um einen Trennriss über eine Einheitsfläche zu erreichen (Zilch et al. 2009), nach verschiedenen Ansätzen (Vos 1983, Model Code 1990 1993, Zink 2000, Model Code 2010 2012 und Bazant 2002) berechnet und in der numerischen Simulation des unverstärkten Systems berücksichtigt, um so den Einfluss derselben auf das Tragverhalten zu identifizieren (siehe Tab. 1).

Wie in Tabelle 1 ersichtlich, ist die Berechnung nach MC 1990 von der Bruchlast her am ehesten dem Versuchsergebnis entsprechend. Dies spiegelt sich auch in der Systemarbeitslinie wider, welche in ATENA berechnet wurde (siehe Abb. 5).

**Tab. 1: Zusammenfassung der errechneten Bruchenergien, erreichte Bruchlasten und Abweichungen zum Versuchsergebnis.**

Berechnungsmethode	MC 1990	Vos	Bazant	Zink	MC 2010
Bruchenergie [MN/m]	$7.2 \cdot 10^{-5}$	$7.59 \cdot 10^{-5}$	$8.7 \cdot 10^{-5}$	$10.2 \cdot 10^{-5}$	$13.8 \cdot 10^{-5}$
Erreichte Bruchlast [kN]	274	296	336	360	387
Abweichung vom Versuchsergebnis [kN]	14	36	76	100	127
Abweichung vom Versuchsergebnis [%]	5	12	29	38	49

Da, wie in Abb. 5 ersichtlich, die Berechnungsvariante nach MC 1990 von der Durchbiegung im Versuch weiter abweicht als die Variante nach Vos, welche zudem in ATENA implementiert ist, wird weiterhin der Vorgabewert für die Bruchenergie herangezogen.



**Abb. 5: Gegenüberstellung der in ATENA simulierten Systemarbeitslinien.**

### 3.3 Berechnung der Gesamtsteifigkeit zur Auffindung der Systemarbeitslinie

Im Stahlbetonbau treten meist hochgradig nichtlineare Materialgesetze auf. Diese führen dazu, dass das Lösen der Gleichgewichtsbedingungen zwischen innerer und äußerer Arbeit nicht in einem Schritt, sondern durch iteratives Lösen des linearisierten Gleichungssystems zu erfolgen hat (Görtz 2004). Dieses Verfahren beruht auf der Newton-Raphson Methode und bedeutet, dass dem System eine konstante Laststeigerung aufgezwungen wird und das Programm auf die dazugehörige Last integriert. Diese Integrationen sind Toleranzen und Abbruchkriterien unterstellt, welche in (Červenka / Procházková 2013) empfohlen werden.

## 4. Vergleich der Ergebnisse

### 4.1 Unverstärktes System

Bei der Modellierung der Balken wurde der Querschnitt entsprechend der Bauteilgeometrie in der Mitte reduziert, sodass ein eindeutiges Querkraftversagen hervorgerufen wird. Dies bildete sich auch in der Simulation mit ATENA deutlich aus (siehe Abb. 6).

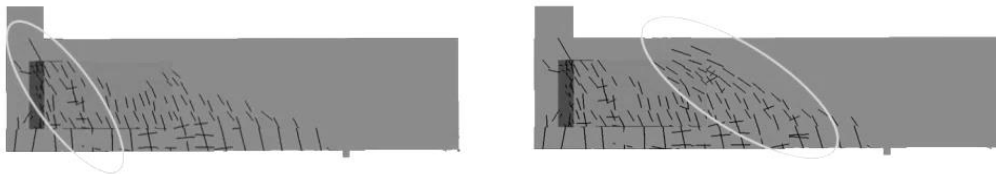


Abb. 6: Links: Rissbild beim Erreichen der Traglast; rechts: Rissbild nach Versagen.

### 4.2 Mit Hybridkleber verstärkte Systeme

Abb. 7 zeigt die Kraft-Durchbiegungskurve des Versuches 2. Hierbei ist gut erkenntlich, dass das System auf die Schrägstäbe umlagert (siehe Knick in Arbeitslinie). Die Berechnung mit ATENA liefert zwar ein annähernd gleich hohes Lastniveau wie der Versuch, die Verformungen sind allerdings deutlich geringer. Die Rissbildung vor dem Versagen entsprach der im Versuch beobachteten (siehe Abb. 8). Zudem bildete sich auch der Versagensriss wie im Versuch aus (siehe Abb. 9 rechts).

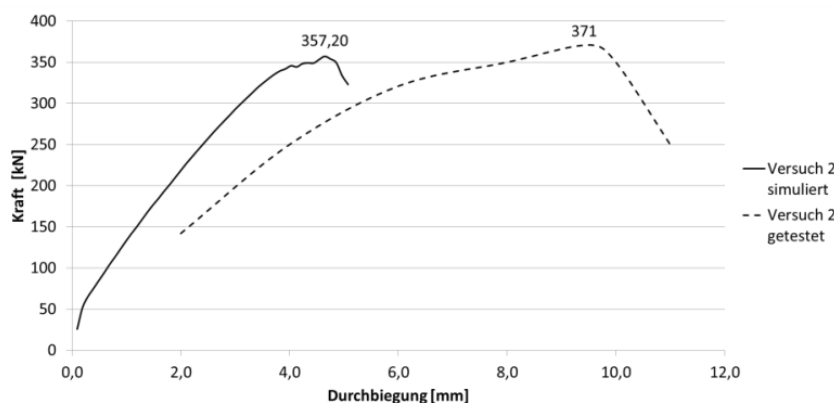
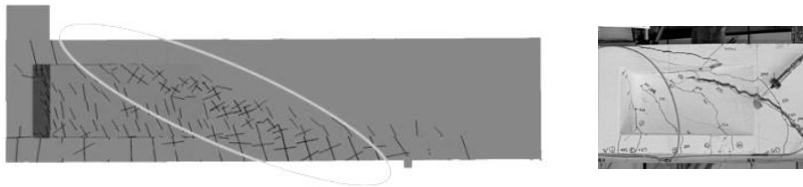


Abb. 7: Kraft- Durchbiegungskurve Versuch 2.



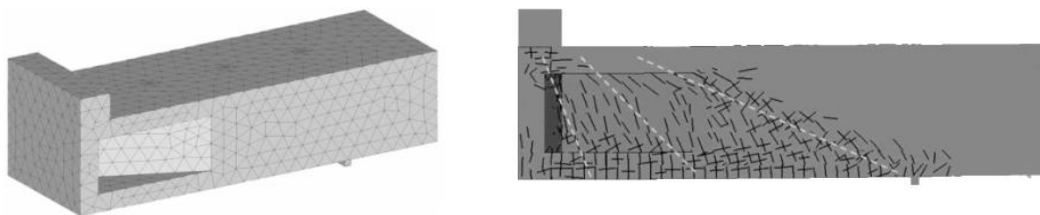
**Abb. 8: Links: Rissbild beim Erreichen der Traglast; rechts: Rissbild im Versuch (Randl / Kunz 2009).**



**Abb. 9: Links: Rissbild nach dem Versagen; rechts: Versagensriss im Versuch (Randl / Kunz 2009).**

### 4.3 Mit Epoxidharzkleber verstärkte Systeme

Wie zuvor schon erwähnt, wurde bei der mit Epoxidharzkleber verstärkten Variante auf eine Hilfskonstruktion von zusätzlichen, die Schrägstäbe umgebenden Makroelementen zurückgegriffen, um die in Rissflächen von Auszugsversuchen beobachtete Verfestigung des umgebenden Betons durch den Epoxidharzkleber zu erfassen. Hierbei wurde auch das FE-Netz verändert, da eine Ausbildung von Brick-Elementen in den Flanschen aufgrund der veränderten Geometrie nicht mehr möglich war (siehe Abb. 10 links).



**Abb. 10: Links: FE-Netz beim mit Epoxidharzkleber verstärkten System; rechts: Rissbild beim Erreichen der Traglast.**

Bei der Simulation dieser Systeme war das Erscheinungsbild der Rissentwicklung im Gegensatz zu den mit Hybridkleber verstärkten Systemen wesentlich stärker ausgeprägt, welches auf die gesteigerte Lastaufnahme zurückzuführen ist (siehe Abb. 10 rechts).

## 5. Zusammenfassung und Schlussfolgerung

Mit Hilfe des FE-Programmes ATENA kann das Querkraftversagen weitestgehend treffsicher abgebildet werden (siehe Tab. 2) und es weist auch das Rissmuster der in der Realität getesteten Balken auf. Während die rechnerische Bruchlast dem real beobachteten Versagenslastniveau mit einer Abweichung von maximal etwa 10% gut entsprach, sind allerdings die Deformationen in der Realität deutlich größer als mittels der FE-Simulation errechnet.

**Tab. 2: Zusammenfassung der Ergebnisse und Vergleich mit den Versuchsergebnissen.**

Versuch Nr.	Erreichte Traglast im Versuch $F_{Vers}$ [kN]	Erreichte Traglast im Versuch $F_{Sim}$ [kN]	$F_{Sim}/F_{Vers}$
2&3	377,5	339,8	0,90
4&5	411,0	374,8	0,91
6	349,0	351,0	1,01
7	376,0	336,4	0,89
9	336,0	325,0	0,97

Die Bruchenergie des Betons wurde nach verschiedenen Ansätzen in der numerischen Simulation variiert. Hierbei zeigte sich ein deutlicher Einfluss derselben auf das unverstärkte System. Am verstärkten System hatte die Variation der Bruchenergie keinen signifikanten Einfluss. Die Kontaktfläche zwischen Beton und Auflager- bzw. Lasteinleitungsstellen wurde ohne Zugübertragung und näherungsweise auch ohne Berücksichtigung von Reibungswirkungen modelliert. Die Simulation des Hybridklebers ist mittels Verbundmodell ausreichend genau, wohingegen die Modellierung des Epoxidklebers anspruchsvoller und mit weiteren, den Übergangsbereich zwischen Ankerstab und Beton repräsentierenden Elementen zu bewerkstelligen ist.

### Literaturliste/ Quellenverzeichnis:

Randl, N. / Kunz, J. (2009): Biegeschubversuche an Stahlbetonbalken mit nachträglich eingemörtelter Bewehrung. Beton- und Stahlbetonbau 104, Heft 11, Berlin Ernst & Sohn.

CEB/FIP Model Code 90, Design Code, Comité Euro-International du Béton Thomas Telford, London 1993.

Vos, E. (1983): Influence of Loading Rate and Radial Pressure on Bond in Reinforced Concrete. Dissertation, Delft University, S. 219-220.

Zink, M. (2000): Zum Biegeschubversagen schlanker Bauteile aus Hochleistungsbeton mit Vorspannung ohne Verbund; Universität Leipzig; Dissertation.

fib (2012): Model Code for Concrete Structures 2010. Fédération internationale du béton, Lausanne 2012, 402 S.

Bazant, Z. (2002): Statistical prediction of fracture parameters of concrete and implications for choice of testing standard. Elsevier Science Ltd

Červenka, V.; Červenka, J.; Pukl, R. (2002): ATENA – A tool for engineering analysis of fracture in concrete. Sadhana, Vol. 27, Part 4, S. 485–492.

Červenka, J.; Procházková, Z. (2013): ATENA Program Documentation; Part 4-2; Tutorial for Program ATENA 3D. Cervenka Consulting, Prag.