

Roland Trummer / Markus Vill

Lebenszyklusorientierte Beurteilung des Querkrafttragverhaltens von Betonbrücken mithilfe von numerischen Methoden und aktuellen Bemessungskonzepten

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

Abstract:

Die Zielsetzung dieses Forschungsprojektes liegt darin, eine Möglichkeit für die Beurteilung der Restlebensdauer bestehender Stahlbetonbrücken mit Defiziten bei der Querkraftbewehrung zu entwickeln. Da viele Bauwerke in unseren Bestandsnetzen noch weiterhin genutzt werden sollen und ihr Zustand im Lebenszyklus optimal beurteilt werden soll, ist dies eine wesentliche Aufgabenstellung für die zielgerichtete Erhaltungsplanung. In diesem Zusammenhang wurden Vergleichsrechnungen zwischen der gültigen Fassung des Eurocode 2 und anderen Normen sowie mit alternativen und innovativen Bemessungskonzepten durchgeführt. Anhand von drei Brückenbauwerken wurden diese Berechnungsmodelle analysiert und mit den Ergebnissen von den zerstörenden Belastungsversuchen an realen Brückenbauwerken verglichen.

Keywords:

Querkrafttragfähigkeit, Querkraftwiderstand, Bemessungskonzept, Brückenbauwerke, Lebensdauer, Zerstörende Belastungsversuche

1. Einleitung

Dieser Beitrag befasst sich mit der Querkrafttragfähigkeit von bestehenden Straßenbrücken aus Spannbeton. Eine Vielzahl von Brückenbauwerken in unseren Verkehrsnetzen wurde in den Jahren 1950 bis 1990 geplant und gebaut. Diese sind in den nächsten Jahren aufgrund der steigenden Verkehrsbelastungen und der fortgeschrittenen Lebensdauer zu untersuchen, zu beurteilen und gegebenenfalls zu ertüchtigen. Bei Umbaumaßnahmen sind die Brücken im Regelfall nach dem aktuellen Normenstand nachzurechnen. Aufgrund der in den Vorgängernormen verhältnismäßig gering ausgeführten Querkraftbewehrung kommt es in vielen Fällen zu Defiziten bei der Nachrechnung bestehender Brücken und im Besonderen bei Spannbetonbrücken, da der Nachweis in vielen Vorgängernormen auf Basis der zulässigen Hauptzugspannungen geführt wurde. Somit musste nur ein Nachweis der Querkraft geführt werden und demzufolge die Differenz mit Bewehrung abgedeckt werden, wenn die zulässige Hauptzugspannung überschritten wurde. In vielen Fällen wurde somit nur eine konstruktive Bewehrung bzw. eine Mindestbewehrung ausgeführt. Bei bereits

durchgeführten zerstörenden Belastungsversuchen konnten große Tragreserven sowie ein Bauteilverhalten bei Versagen mit ausgeprägter Vorankündigung festgestellt werden.

Ursachen hierfür sind zusätzliche Traganteile, die in Abhängigkeit der Laststellung und des Lastniveaus von einer Vielzahl von Parametern beeinflusst werden können. Die Traganteile des Querkraftwiderstandes können sich aus folgenden Anteilen zusammensetzen:

- Traganteil der Querkraftbewehrung
- Traganteil der Rissverzahnung durch Gesteinskörnung im Riss
- Traganteil der Betondruckzone
- Traganteil der Verdübelungswirkung der Längsbewehrung
- Direkte Lastableitung als Druckstrebe im Zuge einer Sprengwerk Wirkung.

Die Ausbildung dieser Traganteile hängt in der Praxis von einer Vielzahl von Einflüssen ab und ist auch von der Höhe des Lastniveaus unterschiedlich ausgeprägt. Bei kleinem Lastniveau werden die Kräfte über eine direkte Lastabtragung als Druckstrebe eines Sprengwerks abgetragen, wenn eine ausreichend große Menge an Längsbewehrung mit geringer Dehnung im Auflagerbereich vorhanden ist. In dem Zusammenhang kann dies auch durch eine sehr flache Ausbildung der Druckstreben erklärt werden. Die Anteile der Querkraft ohne direkten Lastpfad können im ungerissenen Zustand bis zur Überschreitung der Hauptzugspannungen von der Betonquerschnittsfläche übernommen werden. Mit Überschreitung der Hauptzugspannungen über den Wert der Zugfestigkeit steigt mit zunehmender Rissbildung im Bereich der Schubkräfte die Wirkung der Bügeltraganteile und aktiviert gleichzeitig bei entsprechender Rissöffnung und Rissuferschiebung die Rissverzahnung, auch als „aggregate interlock“ bezeichnet. Mit zunehmender Rissbildung kann in weiterer Folge der Effekt der Verdübelungswirkung der Längsbewehrung eintreten, wobei gleichzeitig die Rissverzahnungsanteile bei größeren Rissbreiten über 0,5mm abnehmen. Zur Erreichung der Höchstlast stellt sich ein kritischer Riss zwischen betrachtetem linkem und rechtem Rissufer ein, und das Versagen des Trägers wird durch das Fließen der den Riss kreuzenden Bügelbewehrung sowie das Versagen der anderen Traganteile wie beispielsweise das Verdübelungsversagen und die Einschnürung der Druckzone verursacht.

2. Bemessungsverfahren nach aktuellen Normen und dem Stand der Wissenschaft

Da diese zusätzlichen Tragreserven im Bemessungsmodell des Eurocode 2 nicht abgedeckt sind, wurden von diversen WissenschaftlerInnen erweiterte Berechnungsverfahren entwickelt, in denen verschiedene Tragmechanismen zusätzlich mitberücksichtigt werden können. In weiterer Folge werden diese unterschiedlichen Bemessungsverfahren in den Grundzügen vorgestellt.

Derzeit existieren folgende ingenieurmäßigen Bemessungsansätze, die in aktuellen Normen, Regelwerken und Fachpublikationen veröffentlicht wurden. Des Weiteren wurden im Rahmen dieses Beitrages ausgewählte Bemessungsansätze miteinander verglichen.

- EC 2
- fib Model Code 2010

- ACI 318-14
- Bemessungsvorschlag von A. Mari und A. Cladera
- Bemessungsvorschlag J. Hegger und M. Herbrand.

2.1 fib Model Code 2010

Der fib Model Code 2010 unterscheidet die Grade der Genauigkeit der Berechnungen, genannt „level of approximation“, abgekürzt mit LoA. Es gibt drei Stufen der Berechnung von LoA I bis LoA III. Je fortgeschrittener die Berechnung, desto mehr Parameter fließen in die Berechnung mit ein. Nachfolgend angeführt sind die Formeln für die Querkraftwiderstandsberechnung nach fib Model Code LoA III. Ein signifikanter Unterschied zur Berechnung mittels des Eurocode 2 ist die Miteinbeziehung der einwirkenden Schnittkräfte und die Berücksichtigung des Betontraganteiles infolge aggregate interlock. Weiterhin gehen das Größtkorn des Betons sowie die Längsdehnung auch bei der Neigung der Betondruckstrebe in den Nachweis mit ein. Hierfür werden nicht die maximalen Schnittkräfte verwendet, sondern jene Schnittkräfte an der betrachteten Stelle.

Traganteil infolge aggregate interlock:

$$V_{Rd,c} = k_v \times \frac{\sqrt{f_{ck}}}{\gamma_c} \times z \times b_w \quad (1) \quad k_v = \frac{0,4}{1+1500 \times \epsilon_x} \times \frac{1300}{1000+k_{dg} \times z} \quad (2) \quad \epsilon_x = \frac{\left(\frac{M_{Ed}+V_{Ed}+N_{Ed} \times \frac{z_p - e_p}{z}}{z}\right)}{2 \times \left(\frac{z_s}{z} \times E_s \times A_s + \frac{z_p}{z} \times E_p \times A_p\right)} \quad (3)$$

$$k_{dg} = \frac{32}{16 + d_g} \geq 0,75 \quad (4)$$

Traganteil der Bügelbewehrung:

$$V_{Rd,s} = \frac{A_{sw}}{s} * z * f_{yd} * \cot \theta \quad (5)$$

2.2 ACI 318

Das Berechnungsverfahren der amerikanischen Norm ACI unterscheidet sich gänzlich von dem des Eurocodes, das nicht zuletzt wegen der unterschiedlichen Einheiten aus dem angloamerikanischen Einheitensystem. Ein wichtiger Unterschied liegt in den unterschiedlichen Teilsicherheitsbeiwerten. Ähnlich wie bei dem fib Model Code werden auch in der amerikanischen Norm die Schnittkräfte im Abstand „d“ vom Auflager betrachtet. Die Traganteile des Betons sowie des Stahls werden separat ermittelt. Zudem werden auch Traganteile wie Dübelwirkungen und äußere Einwirkungen etc. berücksichtigt. Der kleinste Wert der unten dargestellten Gleichungen ist für den Traganteil des Betons maßgebend. Der Faktor λ berücksichtigt dabei den Einfluss der Betonart. Der Traganteil der Bügelbewehrung errechnet sich analog dem Eurocode 2 mit einer Druckstrebenneigung von 45°.

$$V_c = 3,5 \times \lambda \times \sqrt{f'_c} \times b_w \times d \quad (6)$$

$$V_c = \left(1,9 \times \lambda \times \sqrt{f'_c} + 2500 \times \rho_w \times \frac{V_u \times d}{M_u} \right) \times b_w \times d \quad (7)$$

$$V_c = \left(1,9 \times \lambda \times \sqrt{f'_c} + 2500 \times \rho_w \right) \times b_w \times d \quad (8)$$

2.3 Ansatz von A. Mari und A. Cladera

Gleich wie beim fib Model Code wird auch hier der Nachweis des Querkraftwiderstandes am kritischen Querschnitt im Abstand „d“ vom Auflager entfernt, durchgeführt. Zudem wird in diesem Berechnungsmodell versucht, die Betontraganteile und die Stahltraganteile zu addieren. Ein weiterer Unterschied liegt in der Wahl der Neigung des Druckstrebenwinkels θ , der aufgrund der Höhe der Druckzone und der Rissbildung errechnet wird. Der zusätzliche Traganteil der Betondruckzone wurde empirisch mittels Versuchsdaten und Kalibration festgelegt.

2.4 Ansatz von J. Hegger und M. Herbrand

Der Berechnungsansatz von J. Hegger und M. Herbrand basiert auf dem Eurocode 2 und ist als Modifikation der Norm für den Betontraganteil zu verstehen. Einflussgrößen bei diesem Bemessungsansatz sind der Size Effekt, die Schubslankheit sowie der Anteil der Betondruckzone, der zusätzlich zu dem Traganteil der Bewehrung addiert werden darf. Der Traganteil der Betondruckzone basiert auf dem Anteil der Bauteile ohne Querkraftbewehrung gem. EC2 und wurde mittels Faktoren für Size effect und Schubslankheit modifiziert. Das Modell wird für Nachrechnungen empfohlen.

3. Anwendung und Auswertung von Bemessungsverfahren und Gegenüberstellung von Versuchsergebnissen mit den Berechnungsergebnissen

Im folgenden Kapitel werden drei Brückenbauwerke vorgestellt, die zu Versuchszwecken mit zerstörenden Belastungsversuchen bis zur Bruchgrenze auf Querkraftversagen getestet wurden. Darüber hinaus wurde eine Auswertung und Gegenüberstellung ausgewählter Bemessungsmodelle mit den Versuchsergebnissen durchgeführt.

3.1 Belastungsversuche an der Salzachbrücke in „Werfen“

Diese Straßenbrücke wurde im Jahre 1953 als 2-feldiger Durchlaufträger mit einer Spannweite von jeweils 31,30m als Spannbetontragwerk mit nachträglichem Verbund errichtet. Das Tragwerk wurde als doppelter Plattenbalken hergestellt und über dem Flusspfeiler als Hohlkasten ausgebildet. Die beiden 45cm breiten Stege mit einer Konstruktionshöhe von 1,57m wiesen einen Achsabstand von 3,20m auf. Die Gesamtbreite der Brücke betrug 6,5m. Die Plattenstärke wies im Mittel ca. 25cm auf und war quer zur Brückenachse vorgespannt. Die Stege der Brücken wurden längs zur Brückenachse mit jeweils 16 Stück Spannstahl ST85/105 Rg Ø 26 vorgespannt. Im Feldbereich wurden Bügel Ø8 mit einem Abstand von 25cm verwendet, in den Auflagerbereichen wurden Bügel Ø10 ebenfalls alle 25cm verlegt. In der nachfolgenden Grafik sind die Ergebnisse der einzelnen Bemessungsmodelle der

Salzachbrücke „Werfen“ gegenübergestellt. Im Zuge des Abbruches wurden zerstörende Belastungsversuche an 14m langen Trägern durchgeführt (Abbildung 1).



Abbildung 1: Salzachbrücke in „Werfen“, links: Versuchsbaufbau, rechts: Brücke im ehemaligen Zustand

Die ersten beiden linken Säulen in Abbildung 2 stellen die Berechnung des Querkraftwiderstandes lt. Eurocode 2 mit jeweils unterschiedlichen Druckstrebenwinkeln im Bereich des Mittelauflegers dar. In der dritten Säule ist das Bemessungsergebnis vom Model von J. Hegger und M. Herbrand eingetragen. Die vierte und fünfte Säule stellen die Ergebnisse zufolge fib MC 2010 in zwei unterschiedlichen Genauigkeitsgraden dar. Die sechste Säule repräsentiert das Bemessungsergebnis von A. Mari und A. Cladera. Die siebte Säule repräsentiert die einwirkende Querkraft an der betrachteten Stelle im Bereich des Mittelauflegers zufolge der statischen Bemessung abzüglich der entlastenden Komponente zufolge Vorspannung auf Basis des Eurocode 1. In der äußerst rechten Säule wurde die Bruchlast zufolge des Belastungsversuches eingetragen. Der Vergleich belegt die hohe Tragfähigkeit bei Querkraftbeanspruchung bei der getesteten Laststellung. Beim Vergleich der Ergebnisse von fib Model Code 2010 und Eurocode 2 wird deutlich, dass aufgrund der hohen Momentenbeanspruchung im Bereich des Mittelauflegers und der zugleich hohen Querkraft die Dehnung steigt, was gleichzeitig eine Reduktion des Druckstrebenwinkels und eine Reduktion des Betontraganteils zur Folge hat. Aufgrund dieser Tatsache ergibt sich gem. dem Nachweisformat des fib MC 2010 ein geringerer Widerstand.

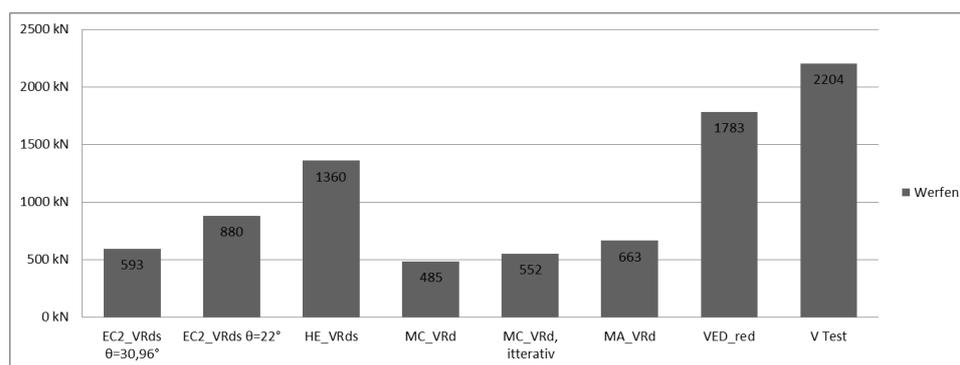


Abbildung 2: Gegenüberstellung von Bemessungsergebnissen der Salzachbrücke „Werfen“

3.2 Belastungsversuche am Brückenbauwerk „Südtiroler Platz“

Im Jahre 1959 wurden am Südtiroler Platz Straßenbrückenträger als vorgespannte Plattenbalkenquerschnitte mit Quervorspannung ausgeführt. Diese mussten aufgrund der

Neuerrichtung des Wiener Hauptbahnhofes entfernt werden, da die Nachweise mit den heute gültigen Normen nicht mehr zu einem positiven Ergebnis führten. Zu Forschungszwecken wurden auch hier insgesamt drei Träger mit zerstörenden Belastungsversuchen hinsichtlich Querkrafttragverhaltens getestet (Abbildung 3).



Abbildung 3: Trägerversuche „Südtiroler Platz“

Bei dem untersuchten Träger handelt es sich um einen Einfeldträger mit einer Spannweite von ca. 17,5m und einer veränderlichen Trägerhöhe, mit 1,28m im Auflagerbereich und 1,38m im Feldbereich. Der Steg wies eine Breite von ca. 20cm bis 25cm sowie eine Verbreiterung im Untergurt von 60cm auf. Die Platte hatte eine Breite von 3,30m und eine Stärke von 25 bis 30cm. Im Auflagerbereich wurde eine Bügelbewehrung mit einem Durchmesser 12mm und einem Abstand von 20cm eingebaut. Abbildung 4 zeigt die Ergebnisse, die Säulen sind analog zu Abbildung 2.

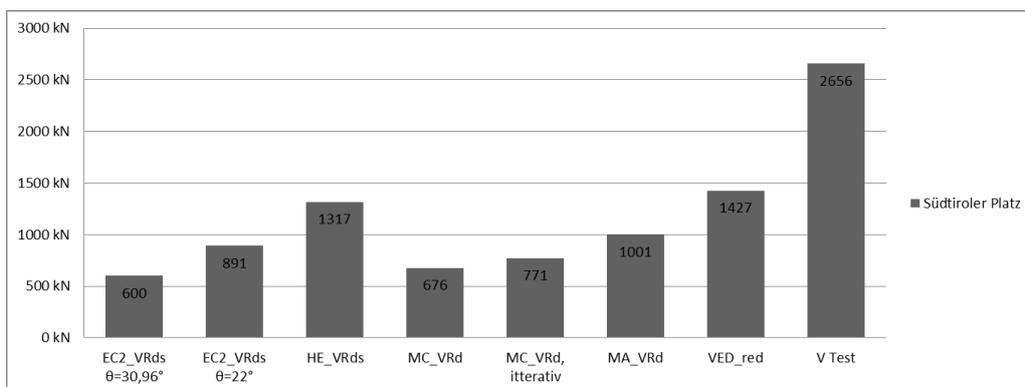


Abbildung 4: Gegenüberstellung von Bemessungsergebnissen der Brückenträger „Südtiroler Platz“

3.3 Belastungsversuche am Brückenbauwerk „Melk“

Bei dieser Straßenbrücke handelt es sich um einen Einfeldträger mit Kragarm aus dem Jahre 1959 als vorgespanntes Plattenbalkentragwerk (Abbildung 5). Die Brücke bestand aus 4 Längsträgern, die über Trägerroste miteinander verbunden waren. Die Spannweite betrug 21,0m Im Auflagerbereich wurden Bügel mit einem Durchmesser von 14mm und einem Abstand von 20cm gewählt, im Feldbereich eines Trägers waren Bügel $\varnothing 12$ im Abstand 25cm eingebaut.

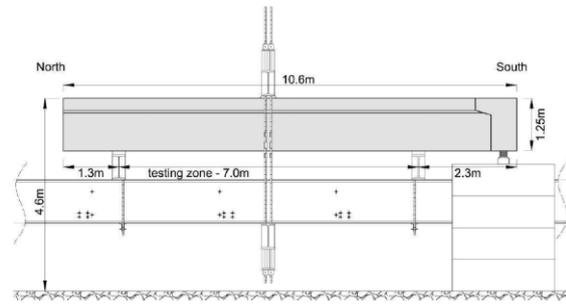


Abbildung 5: Versuchsaufbau „Melk“, links: maßgebender Schubriss nach Versagen, rechts: Versuchsaufbau

Die Ergebnisse in Abbildung 6 zeigen die Unterschied zwischen den einzelnen Modellen und verdeutlichen die Notwendigkeit des Ansatzes zusätzlicher Traganteile für die Nachrechnung von bestehenden Spannbetonbrücken mit geringen Querkraftbewehrungsgraden. Wie bei dem Projekt Salzachbrücke „Werfen“ verdeutlicht der Vergleich die Unterschiede zwischen fib Model Code 2010 und dem Eurocode 2. Bei der Berechnung des Widerstandes gem. fib Model Code ergeben sich bei hohem Bemessungsmoment und hoher Querkraft steilere Druckstrebenwinkel als gem. Eurocode 2 sowie ein sehr geringer Anteil der Betondruckzone. Abbildung 6 zeigt die Ergebnisse, die Säulen sind analog zu Abbildung 2.

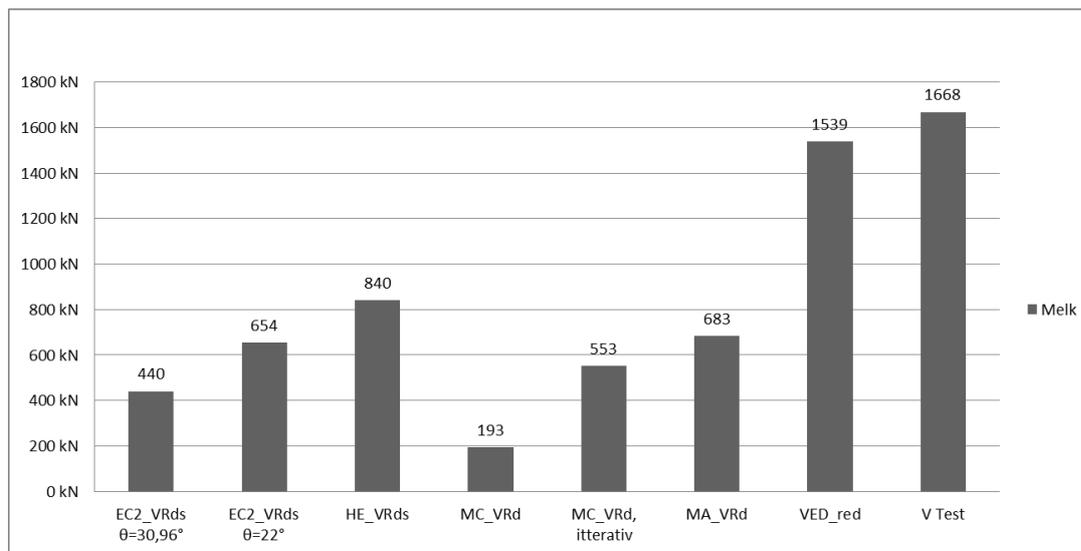


Abbildung 6: Gegenüberstellung von Bemessungsergebnissen am Bauwerk „Melk“

4. Zusammenfassung der Ergebnisse:

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass alle Belastungstests an den vorgespannten Brückenbauwerken deutlich höhere Querkraftwiderstände als die Bemessungsmodelle ergaben. Einerseits wird durch den Einfluss der Vorspannung die Sprengwerkwirkung verstärkt und andererseits der Traganteil des Betons durch die höhere Betondruckzone verstärkt. Weiterhin spielt der Einfluss der Verdübelung der Vorspannung eine entscheidende Rolle, da die sog. Dübelrisse an der Unterseite der Träger nicht auftraten. Aufgrund der zentralen Lage im Stegbereich des Auflagers kann ein hoher Tragwiderstand durch Verdübelungseffekte entstehen. Eine Nachrechnung dieser

Spannbetonträger analog Eurocode 2 weist einen sehr konservativen Ansatz für Bestandsbrücken auf. Die Weiterentwicklung alternativer Nachrechnungskonzepte ist für eine qualitative Beurteilung dieser Bestandsobjekte unumgänglich.

5. Weiterer Ausblick

In weiterer Folge sind ergänzende zerstörende Belastungsversuche an Testserien vorgesehen. Dabei wird besonderes Augenmerk auf eine realistische Laststellung und Konfiguration der Versuchsträger gelegt. Einerseits ist der Einfluss der Lastaufbringung als Gleichlast zu untersuchen und andererseits ist die Bruchkinematik im Bereich des Innenauflegers von Durchlaufträgern von besonderem Interesse. Die Ergebnisse dieser Belastungsversuche werden mithilfe von analytischen Berechnungsmethoden verglichen. Diese Modelle werden anhand der gemessenen Daten kalibriert, um eine Aussage über vorhandene Traganteile hinsichtlich des Querkraftwiderstandes zu erhalten.

Literaturliste/ Quellenverzeichnis:

Dornetshumer, Franz (2015): Methoden zur Beurteilung von Stahlbetonplattenbrücken ohne Querkraftbewehrung aus den 1940er bis 1990er Jahren unter Anwendung von probabilistischen Berechnungsverfahren, Wien Diplomarbeit FH Campus Wien.

Huber, P., Huber, T. and Kollegger, J. (2016): Investigation of the shear behavior of RC beams on the basis of measured crack kinematics, Engineering Structures 113 (2016), pp 41-58

Herbrand, M.; Kueres, D.; Claßen, M.; Hegger, J.: Einheitliches Querkraftmodell zur Bemessung von Stahl- und Spannbetonbrücken im Bestand. Beton- und Stahlbetonbau 111, Heft 2, pp. 58-67, Ernst und Sohn Verlag, Berlin, 2016

Vill, M., Schweighofer, A. und Kollegger, J. (2012): Großversuche an Spannbetonbrückenträgern zur Beurteilung des Schubtragverhaltens, Beton- und Stahlbetonbau 107 Heft 2, 86-95, Ernst und Sohn Verlag, Berlin, 2012

Vill, M., Torghele, H., Brunner, H. und Kollegger, J., Zerstörende Belastungsversuche zur Untersuchung des Schubtragverhaltens von vorgespannten Trägern einer Straßenbrücke, Beton- und Stahlbetonbau , 106 (3), Ernst und Sohn Verlag, Berlin, 2011

Mari, Antonio.; (2014): Shear-flexural strength mechanical model for the design and assessment of reinforced concrete beams. In: Structure and Infrastructure Engineering, Maintenance, Management, Life-Cycle Design and Performance. London: Taylor & Francis

International Federation for Structural Concrete: fib Model Code for Concrete Structures 2010. Lausanne 2010.

ACI – American Concrete Institute: 318-14 – Building Code Requirements for Structural Concrete and Comentary, 1st printing. September 2014

Tue, Nguyen (2014): Schubverhalten von Biegebauteilen ohne Querkraftbewehrung, Beton und Stahlbetonbau 109 Heft 10, 86-95

Schweighofer, Anton (2010): Zerstörende Belastungsversuche an alten Spannbetonträgern zur Ermittlung des Schubtragverhaltens. Wien: Prüfbericht Nr.212/2-2010-3

Torghele, Harald (2007): Schubversuche an ausgebauten Brückenträgern aus Spannbeton der Salzachbrücke in Werfen. Wien: Diplomarbeit TU Wien