

HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

Conference Paper, Published Version

Tue, Nguyen Viet; Ehmann, Rainer

Neues Querkraftmodell für Stahlbetonbauteile ohne Schubbewehrung

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/102296>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Tue, Nguyen Viet; Ehmann, Rainer (2015): Neues Querkraftmodell für Stahlbetonbauteile ohne Schubbewehrung. In: Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.): Nachrechnung von (massiven) Wasserbauwerken. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau. S. 82-88.

Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.



Neues Querkraftmodell für Stahlbetonbauteile ohne Schubbewehrung

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. N. V. Tue (TU Graz), Dipl.-Ing. R. Ehmann (BAW)

Einführung

Bei der Nachrechnung von Wasserbauwerken, u.a. Durchlässe und Brückenwiderlager im Zuge der Nachsorge, sind regelmäßig erhebliche Tragfähigkeitsdefizite bei der Querkraftbemessung aufgetreten. Es handelte sich meist um plattenartige Stahlbetonbauteile ohne Schubbewehrung, die nach früheren Normen bemessen wurden. Die DIN 1045, Ausgabe 1959, sah für Platten noch hohe zulässige Schubspannungen ohne erforderliche Schubbemessung vor. Mit den Normenausgaben 1972 bis 1988 wurden diese Werte praktisch halbiert. Eine weitere Reduktion des Querkraftwiderstandes erfolgte mit der Einführung der Eurocodes. Daher sind bei der Nachrechnung bestehender Bauwerke mit neueren Normen Defizite zu erwarten („konzeptionelle Alterung“). Ähnliche Erkenntnisse wurden auch bei der Nachrechnung von Brücken, hier insbesondere Spannbetonbrücken festgestellt, was eine rege Forschungsaktivität auslöste.

Seit über 100 Jahren setzen sich Forscher mit der Querkraftbemessung von Stahlbetonbauteilen auseinander, weit über tausend Versuche wurden durchgeführt und unterschiedliche Theorien und Modellvorstellungen entwickelt. Die wesentlichen Komponenten der Querkrafttragfähigkeit von gerissenen Stahlbetonbauteilen ohne Querkraftbewehrung konnten identifiziert werden. Unklarheit besteht allerdings darin, wie die unterschiedlichen Komponenten zusammenwirken und wie ihre Anteile zu quantifizieren sind. Auch die heute gültigen Vorschriften in verschiedenen Ländern gehen von unterschiedlichen Modellvorstellungen aus und liefern damit auch unterschiedliche Bemessungsergebnisse. Zu den Versuchen ist anzumerken, dass die überwiegende Mehrheit an Einfeldträgern unter Einzellasten mit geringen Querschnittshöhen durchgeführt wurden. Hohe Balken, andere statische Systeme und andere Belastungsarten sind selten. Dabei ist bekannt, dass hohe Querschnitte eine (relativ zur Höhe) geringere Querkrafttragfähigkeit aufweisen und dass der Querkraftwiderstand bei Trägern unter Gleichstreckenlast größer ist.

Bei den bisherigen deutschen Normen und auch beim heute gültigen Eurocode EC2 (2011) ist die Querkrafttragfähigkeit bei Stahlbetonbauteilen ohne Schubbewehrung eine Querschnittseigenschaft, welche nicht durch eine Biegebeanspruchung beeinflusst wird. Anders ist dies bei der Modified Compression Field Theory (MCFT) (Vecchio & Collins, 1986), deren Vereinfachung auch in den *fib* Model Code 2010 (2013) Eingang gefunden hat, und auch bei der, der Schweizer Norm SIA (2003) zu Grunde liegenden Critical Shear Crack Theory (CSCT) (Muttoni & Ruiz-Fernandez, 2008). Bei beiden Theorien beeinflusst das zugehörige Biegemoment die Querkrafttragfähigkeit negativ, was in Bereichen mit hohen Biegemomenten, z.B. bei Durchlaufträgern im Bereich der Mittelstützen, zu einer gegenüber dem EC2 geringeren Querkrafttragfähigkeit führt.

Insgesamt ist die Situation aus ingenieurwissenschaftlicher Sicht sehr unbefriedigend, da es – im Gegensatz zur Biegebemessung - bisher nicht gelungen ist, ein allgemein akzeptiertes, mechanisch konsistentes Bemessungsmodell für die Abtragung von Querkräften zu entwickeln.

Neues Querkraftmodell der TU Graz für Stahlbetonbauteile ohne Querkraftbewehrung

Das hier kurz beschriebene Modell ist in (Tue et al. 2014a; Tue et al. 2014b) ausführlich dargestellt. Das Modell analysiert die Spannungszustände im gesamten Schubfeld unter Berücksichtigung der gleichzeitigen Wirkung von Querkraft- und Biegebeanspruchung.

Schubschlanke Stahlbetonbauteile ($a/d > 2,5$) mit Rechteckquerschnitt und ohne Querkraftbewehrung weisen ein Biegeschubversagen auf, d.h. der zum Versagen führende Riss, der kritische Schubriss, entwickelt sich aus einem Biegeriss. Anschaulich ist dies bei einem Einfeldträger zu verdeutlichen. Zunächst entstehen in Feldmitte im Bereich der größten Momente nahezu senkrechte Biegerisse. Mit steigender Belastung entwickeln sich zum Auflager hin weitere Risse, die wegen der zunehmenden Schubbeanspruchung stärker vom senkrechten Verlauf abweichen und dem Verlauf der Hauptdrucktrajektorien des Zustandes I folgen.

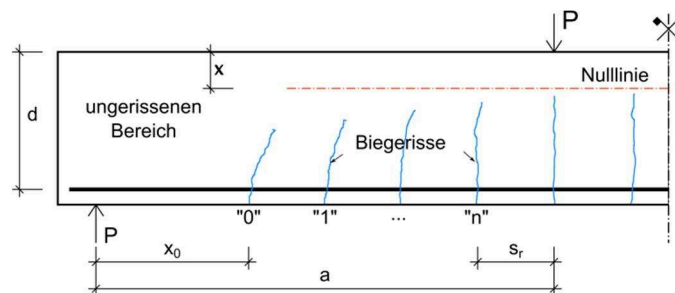


Bild 1: Biegerissbild in einem Einfeldträger unter Einzellasten

Zwischen Zug- und Druckgurt liegt eine zugfeste Verbindung vor, es gilt die Balkentheorie mit Ebenbleiben der Querschnitte. Unter Berücksichtigung der Betonzugspannung in der Zugzone können die Normal- und Schubspannungen sowie die Hauptspannungen im Riss über die Querschnittshöhe und aufgetragen werden:

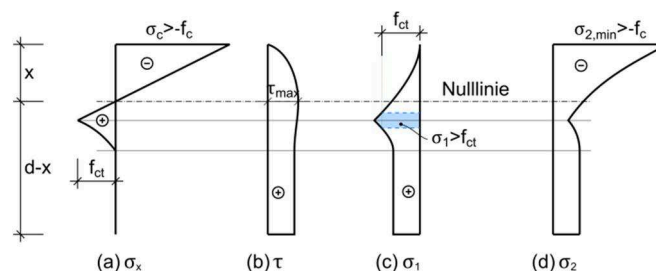


Bild 2: Spannungsverteilung über die Höhe am Riss

Um die Risspitze ist immer ein schmaler Bereich gegeben, wo die Hauptzugspannung σ_1 die Betonzugfestigkeit erreicht (eingefärbter Bereich im Bild 2). Ein Makroriss kann jedoch nur dann entstehen, wenn nicht nur punktuell, sondern über eine bestimmte Höhe die Betonzugfestigkeit überschritten wird. Im Bild 3 (b) sind die Spannungsverhältnisse an 2 benachbarten Querschnitten (Rissen) mit nach links abnehmender Biegebeanspruchung und gleicher Querkraftbeanspruchung dargestellt. Bei geringerem Biegemoment nimmt die Höhe des Bereichs mit Betonzugspannungen zu. Vom letzten Biegeriss nahe am Auflager bis zum Ende des Schubfeldes bildet sich oberhalb der Risspitzen der Biegerisse ein potenzielles Schubband, siehe Bild 3 (a). In diesem potenziellen Schubband bilden sich mehrere Mikrorisse annähernd senkrecht zur Richtung der schiefen Hauptzugspannung σ_1 . Wird die Breite des Schubbandes ausreichend groß, fangen die Mikrorisse an zusammen zu wachsen. Wächst der kritische Schubriss über die Spitze des benachbarten Biegerisses, trennt er die kraftschlüssige Verbindung zwischen Druck- und Zugzone. Wenn in diesem Zustand ein Gleichgewicht zwischen konstantem Zuggurt (Längsbewehrung) und geneigtem Druckgurt möglich ist, kann sich durch Änderung des Kraftflusses in Verbindung mit einer Verformungszunahme ein Sprengwerk ausbilden, Bild 3 (c), andernfalls kommt es zu einem plötzlichen Versagen.

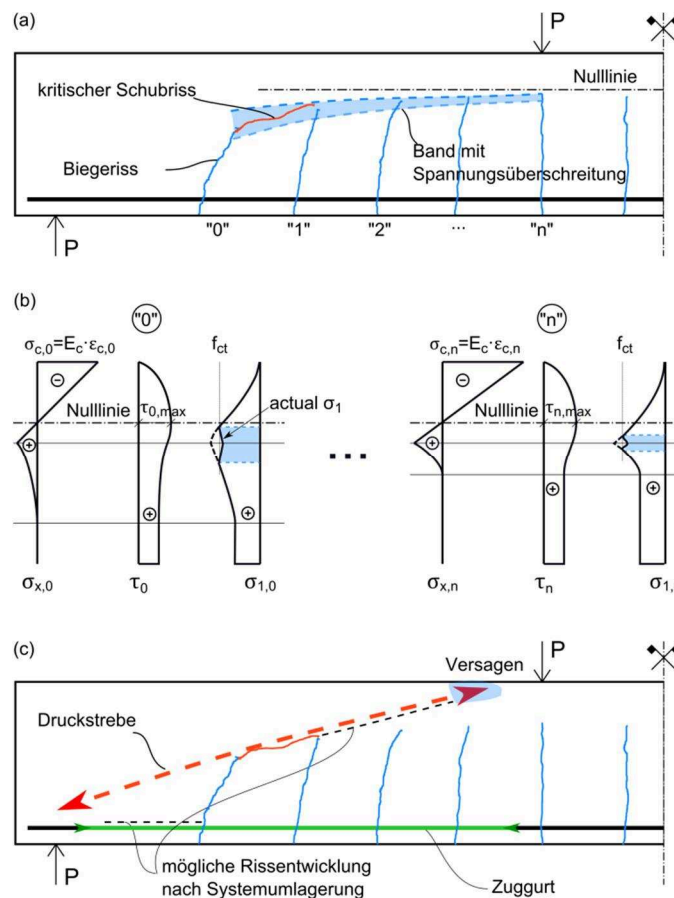


Bild 3: Schubrissbildung

Bei Trägern mit geringer Schubschlankheit ist ein stabiles Sprengwerk mit weiterer Laststeigerung möglich. Es handelt sich hier um eine Systemänderung, die außerhalb der Mechanik schubschlanker Bauteile zu sehen ist. Für die weitere Betrachtung bedeutet dies, dass mit der Entstehung des kritischen Schubrisses die Querkrafttragfähigkeit eines schubschlanken Bauteils erreicht ist.

Versuche an schubschlanken Stahlbetonbauteilen

Das grundlegend neue Querkraftmodell, das aus Versuchsbeobachtungen und consequenten mechanischen Überlegungen abgeleitet wurde, muss natürlich durch Versuche überprüft werden. Wegen der implementierten Wechselwirkung von Querkraft- und Momentenbeanspruchung, war es erforderlich, unterschiedliche M/V-Kombinationen zu untersuchen, zumal bei diesem neuen Modell im Gegensatz zur MCFT und CSCT das Biegemoment die Querkrafttragfähigkeit positiv beeinflusst.

Es sind generell folgende Schubfeldtypen zu unterscheiden:

- Schubfeldtyp 1: konstante Querkraft und zunehmendes Moment, z.B. Einfeld- und Kragträger unter Einzellast
- Schubfeldtyp 2: abnehmende Querkraft und zunehmendes Moment, z.B. Einfeldträger und Feldbereich von Durchlaufträgern unter Gleichstreckenlast
- Schubfeldtyp 3: zunehmende Querkraft und zunehmendes Biegemoment, z.B. Kragträger und Stützbereich von Durchlaufträgern unter Gleichstreckenlast.

In einer ersten Versuchsserie wurden 10 Stahlbetonbalken mit Rechteckquerschnitt an den 3 statischen Systemen Krag-, Einfeld- und Durchlaufträger unter Einzel- und Gleichstreckenlasten getestet.

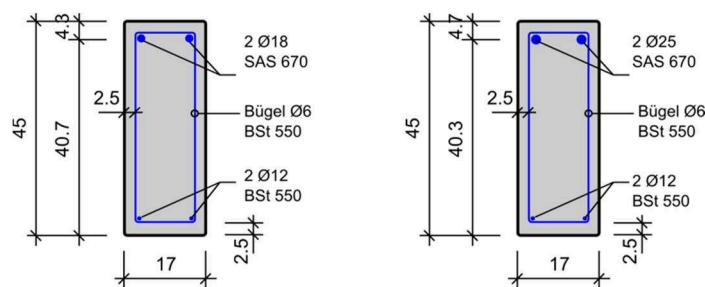


Bild 4: Querschnitte der Versuchsbalken

Neben der Variation von statischem System und der Belastungsart, wurden auch unterschiedliche Längsbewehrungsgrade untersucht. Um im interessierten, schubunbewehrten Bereich die Schubrissbildung auszulösen, wurden andere Bereiche mit Querkraftbügeln bewehrt. Bild 5 zeigt beispielhaft einen Kragbalken unter Gleichstreckenlast. Weitere Einzelheiten zu den Versuchen und deren Ergebnisse können der Literatur (Tue et al. 2015a; Tue et al. 2015b) entnommen werden.

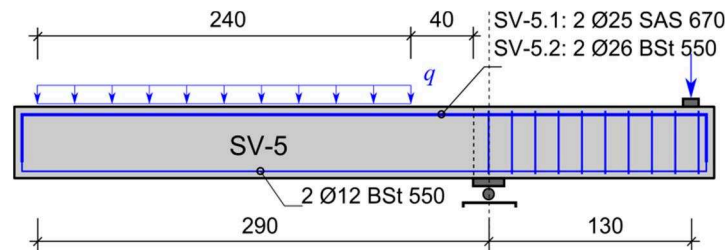


Bild 5: Getesteter Versuchsbalken: Kragträger unter Gleichstreckenlast

Eine versuchstechnische Herausforderung war das Aufbringen einer Gleichstreckenlast, die in Anlehnung an Leonhardt und Walther (1962) über einen wassergefüllten Feuerwehrschauch erfolgte.



Bild 6: Aufbringen der Gleichstreckenlast auf einen Kragträger

Die Versuchslast wurde weggesteuert in Laststufen bis zum Versagen der Träger kontinuierlich aufgebracht. Neben dem Messen von Kräften, Durchbiegungen, Dehnungen und Rissverläufen wurde in dem Bereich des erwarteten Schubrisses eine optische 3D-Vermessung mit einer Spezialkamera vorgenommen.

Ergebnisse

Wie im Vorfeld rechnerisch ermittelt, wurde in allen Balken vor dem Fließen der Biegebewehrung ein Querkraftversagen infolge der Bildung eines kritischen Schubrisses beobachtet. Vor dem Auftreten des kritischen Schubrisses stimmen die über die Bauteilhöhe gemessenen Dehnungen mit der Biegetheorie recht gut überein, d.h. das Ebenbleiben der Querschnitte und damit der Querkraftabtrag auch in der Betonzugzone gemäß Modell konnte bestätigt werden. Bei allen Balken entwickelte sich der Schubriss aus einem Biegeriss. Bei den meisten Balken trat nach Auftreten des kritischen Schubrisses ein unverzüglicher Lastabfall und ein sprödes Versagen ein. Bei 3 Balken konnte sich noch ein Sprengwerk mit weiterer Laststeigerung bei geringerer Steifigkeit einstellen, das Versagen erfolgte dann durch Überschreiten der Betondruckfestigkeit der Druckstrebe.

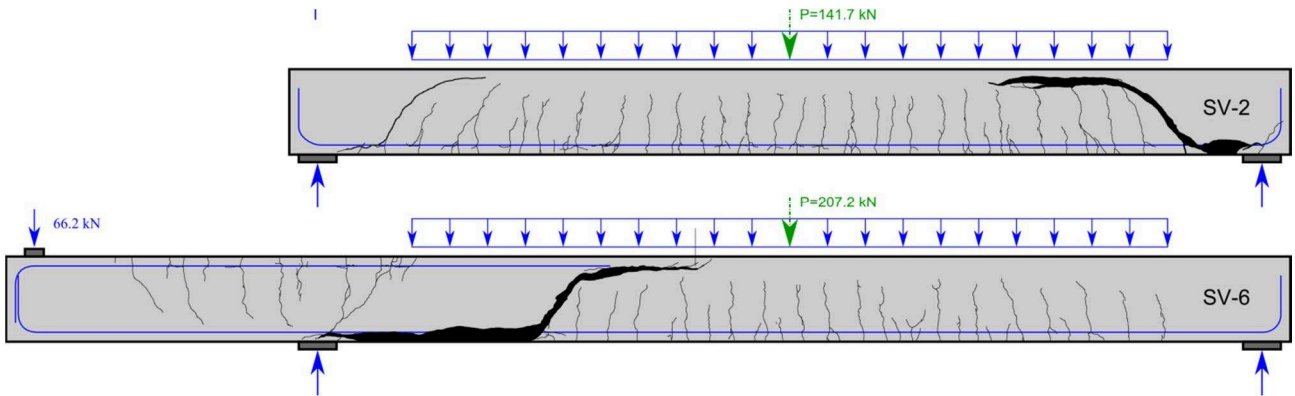
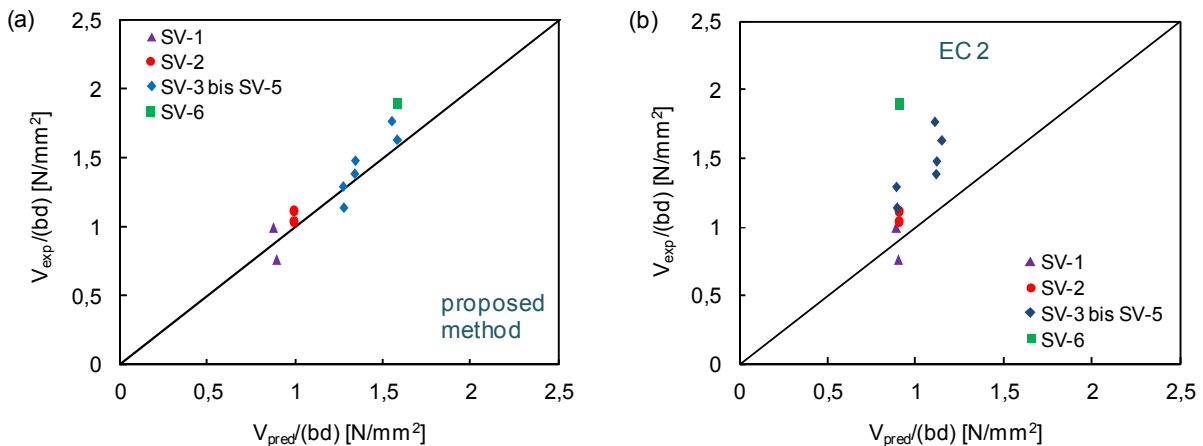


Bild 7: Rissbilder nach dem Schubversagen am Beispiel des Einfeldträgers und des Durchlaufträgers unter Gleichstreckenlast

Die Ergebnisse der ersten Versuchsserie zeigen eindrücklich den Einfluss des statischen Systems und der Belastungsart auf die Querkrafttragfähigkeit. Hervorzuheben ist das Verhalten des Durchlaufträgers (Bild 7b), hier liegt die Versagensstelle im Feldbereich nahe des Momentennullpunktes. Die Querkraft in diesem Bereich entspricht der aufnehmbaren Querkraft eines Einfeldträgers, d.h. ein Querkraftversagen bei Mittelstützen von Durchlaufträgern ist wenig wahrscheinlich. Maßgebend sind Endauflager und Bereiche mit positivem Moment.

Für die quantitative Überprüfung wurden die Versuche nach dem neuen Modell der TU Graz und nach gängigen Vorschriften nachgerechnet, die Ergebnisse sind dem Bild 8 zu entnehmen. Es zeigt sich eine sehr gute Übereinstimmung zwischen den experimentellen und den rechnerischen Querkrafttragfähigkeiten nach dem neuen Modell für die verschiedenen Schubfeldtypen. Gegenüber empirischen Bemessungsmodellen z.B. nach EC2, welche vor allem an Versuchen an Einfeldbalken mit Einzellasten kalibriert sind, bildet das hier vorgestellte Modell die Momenten- Querkraft-Kombination unterschiedlicher statischer Systeme und Belastungsarten wirklichkeitsnäher ab.



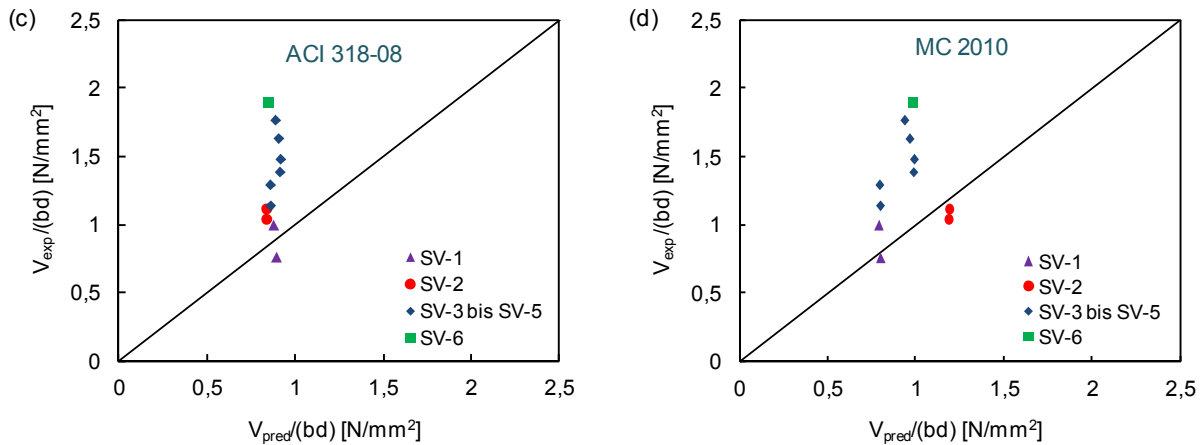


Bild 7: Vergleich der Querkrafttragfähigkeit zwischen den Versuchen und dem neuen Modell der TU Graz (a) sowie gängigen Vorschriften

Literatur

- Eurocode 2. (2011). EN 1992-1-1 : Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau.
- fib. (2013). Model Code for Concrete Structures 2010. Lausanne: International Federation for Structural Concrete.
- Leonhardt, F., Walther, R.: Schubversuche an einfeldrigen Stahlbetonbalken mit und ohne Schubbewehrung. DAFStb Heft 151, 1962.
- Muttoni, A., & Ruiz-Fernandez, M. (2008). Shear Strength of Members without Transverse Reinforcement as Function of Critical Shear Crack Width. ACI Struct. J. , 105 (2), pp. 163-172.
- Swiss Society of Engineers and Architects. (2003). SIA Code 262 for concrete structures. Zürich.
- Tue, N.V., Tung, N.D., Theiler, W. (2014a): Querkrafttragfähigkeit von Bauteilen ohne Querkraftbewehrung, Teil 2: Modellvorstellung. Forschungsbericht für die Bundesanstalt für Wasserbau – unveröffentlicht.
- Tue, N.V., Theiler, W., Tung, N.D. (2014b): Schubverhalten von Biegebauteilen ohne Querkraftbewehrung. Beton- und Stahlbetonbau 109 (2014), Heft 10, S. 666 – 677.
- Tue, N.V., Tung, N.D., Theiler, W. (2015a): Querkrafttragfähigkeit von Bauteilen ohne Querkraftbewehrung, Teil 3: Versuche. Forschungsbericht für die Bundesanstalt für Wasserbau – unveröffentlicht.
- Tue, N.V., Ehmann, R., Tung, N.D. (2015b): Schubversuche an Stahlbetonbalken unterschiedlicher M/V-Kombinationen. Beton- und Stahlbetonbau 110 (2015), Heft 7, S. 446 – 457.
- Vecchio, F. J., & Collins, M. P. (1986). The Modified Compression-Field Theory for reinforced concrete elements subjected to shear. ACI Journal , 88 (22), pp. 219-231.