

Joerg Stoerzel / Norbert Randl / Alfred Strauss

Monitoring von Querkraft-induzierten Schädigungen an schlaff bewehrten und vorgespannten Betonbauteilen

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

Abstract

Im Rahmen des Projektes OMN_ZIN (Optimierte Monitoringsysteme für die Normbasierte Zuverlässigkeitsbewertung von Ingenieurstrukturen), gefördert von der Österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft (FFG), wurden zwei Testreihen mit jeweils vier vorgespannten und schlaff bewehrten rechteckigen und T-förmigen Stahlbetonträgern durchgeführt, um das Querkraftversagen umfassend messtechnisch zu beobachten und den Einfluss der Vorspannung auf die Tragfähigkeit und Duktilität zu untersuchen. Untersucht wurden ferner die Rissentwicklung unter Gebrauchslastniveau sowie die Duktilität nach Erreichen des Traglastniveaus. Im Zuge der ersten Versuche kamen vor allem unterschiedliche konventionelle Messsysteme zur Anwendung, um sowohl die Sensitivität jener Messverfahren zur Erfassung der internen und externen Verformungen infolge Querkraftbelastung als auch die Korrelation der Messverfahren untereinander zu evaluieren. Auf Basis der Ergebnisse der Versuchsauswertungen wurden die Messverfahren und die numerischen Modelle verfeinert. Des Weiteren konnten im Rahmen dieses Projektes schrittweise moderne Messverfahren, wie z.B. Digital Image Correlation (DIC), in die Versuchsreihen integriert werden. Dadurch kann die Anwendbarkeit der verschiedenen Messtechniken zur Erfassung des Querkraftversagens untersucht sowie deren anschließende Optimierung für ein Monitoringsystem durchgeführt werden.

Keywords:

Querkraftversagen, Querkraftmonitoring, Sensorsensitivität, Structural Health Monitoring

1. Einleitung

Der Einfluss der Querkraft auf das Traglastverhalten von sowohl einfach bewehrten als auch vorgespannten Stahlbetonbauteilen ist hochgradig nicht-linear und gegenwärtig noch immer Objekt der Forschung (Marí, et al., 2014) (Ruiz, et al., 2015) (Sigrist, et al., 2013). Im Vergleich mit der rechnerischen Modellierung des Biegeversagens sind die Modellansätze, z.B. nach Eurocode 2, zur Bestimmung der Querkrafttragfähigkeit noch sehr ungenau. Um den Mechanismus des Querkraftversagens besser zu verstehen und den Grad der Schädigung infolge Querkraft an existierenden Tragstrukturen aus Stahlbeton bezüglich der verbleibenden Resttragfähigkeit richtig einzuschätzen, sind spezielle Messsysteme notwendig, die zusammengefasst in Monitoringsystemen zur Überwachung von realen Bauwerken ihre praktische Anwendung finden.

Mittels angepasster Materialmodelle sowie nicht-linearer Finiten Elemente Simulationen zusammen mit speziellen Messsystemen zur Erfassung des realen Strukturverhaltens können der interne Kräftefluss und die Rissentwicklung erfasst und visualisiert werden. Der Vergleich zwischen experimentell ermittelten Daten und den Ergebnissen von numerischen Simulationen ermöglicht eine schrittweise Optimierung der Monitoringsysteme sowie die Verifizierung von aktuellen Modellansätzen zur Ermittlung der Querkrafttragfähigkeit.

2. Versuchsprogramm und -aufbau

Die Versuchsreihe enthielt bisher zwei Testreihen mit insgesamt 8 teilweise vorgespannten Stahlbetonträgern. Die Träger wurden bisher in einem Fertigteilverk vorgefertigt mit unterschiedlichen Querschnitten, die typisch für Betonfertigteilträger sind.

2.1 Versuchskörper

Alle Versuchsträger wurden aus Normalbeton hergestellt mit einer angestrebten Festigkeitsklasse von C50/60. Als Bewehrungsstahl wurde B550 B eingesetzt, mit einer charakteristischen Streckgrenze von 550 MPa und einer Zugfestigkeit von 620 MPa. Für die Spannglieder wurde 1/2" ST 1570/1770 – F 93 verwendet. Es wurden sowohl Rechteck- als auch T-Träger untersucht. Die Trägerhöhe betragen 30, 45 und 60 cm, die Stegbreite ca. 14 cm und Flanschbreite bei den T-Profilen 150 cm. Die Zugbewehrung an der Unterseite der Träger bestand aus 2 \varnothing 20mm ($n_s \times \phi_s$) Längseisen. Beim R45-S wurden jedoch doppelt so viele Längseisen verwendet, um frühzeitiges Biegeversagen zu vermeiden. Fünf Träger der bisherigen durchgeführten Versuchsreihen waren vorgespannt. Um die Interaktion zwischen Querkraft, Biegemoment und Normalkraft zu untersuchen, wurden die gleichen Trägertypen jeweils mit 50 (V1) und 100% (V2) Vorspannung beaufschlagt.

2.2 Aufbau des Belastungstests

Abbildung 1 zeigt schematisch das statische System eines Belastungstests. Die Gesamtlänge L der Träger betrug 5 m. Im Test ergab sich eine Spannweite l_{eff} von 4,75 m. Der Abstand a zwischen Lasteinleitung und dem nächsten Auflager variierte zwischen 970 und 1885 mm, um die Schubslankheit a/d in dem Bereich zu halten, wo sowohl die direkte Ableitung der Prüflast in das Auflager als auch ein vorzeitiges Biegeversagen unwahrscheinlich ist, was somit die Wahrscheinlichkeit für ein Querkraftversagen erhöht (Görtz, 2004) (Randl & Kunz, 2009) (Zink, 2000).

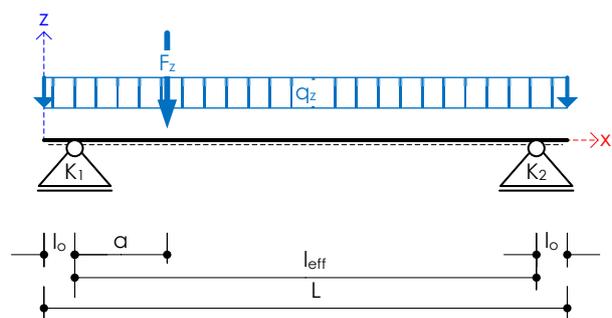


Abbildung 1. Statisches System

Die Schubslankheit stellt das Verhältnis zwischen a und der statischen Nutzhöhe d dar. Bei den vorgespannten Trägern ergibt sich die statische Nutzhöhe d aus dem über die jeweiligen Flächenanteile gewichteten Mittel von d_s der Zugbewehrung und d_p der Spannglieder (Görtz, 2004).

2.2.1 Monitoring

Bei erwarteten Querkraftversagen konzentriert man die Messtechnik auf die Überwachung der Verformungen im Schubfeld sowie die daraus resultierende Rissentwicklung. Zur Erfassung von Dehnungen sind sog. Dehnmessstreifen

(DMS bzw. Strain Gauge SG) ein vor allem in der Praxis leicht gangbarer Weg. Diese können sowohl extern auf der Betonoberfläche aufgetragen oder intern auf den Bewehrungsseisen appliziert werden. Während der Messbereich von DMS eher verhältnismäßig klein ist, was vor allem bei der Anwendung auf der heterogenen Betonoberfläche von Nachteil ist, lässt sich mit sog. Induktiven Wegaufnehmern (Linear Variable Differential Transformer LVDT) die Gesamtverformung eines weitaus größeren Bereiches erfassen (Marx, et al., 2011) (Schacht, et al., 2013).

Im Schubfeld wurden auf der Betonoberfläche DMS appliziert, teilweise in einer rosettenartigen Anordnung, um die Hauptspannungen und deren Neigung in dem Bereich der Rosette zu ermitteln (siehe Abbildung 2). Im Inneren des Trägers wurden im Bereich des Schubfeldes auf einem extra dafür angefertigten Bewehrungsgitter mit Stabdurchmessern von 6 mm interne DMS installiert (siehe Abbildung 3). Die externen und internen DMS wurden in ihrer x/z-Position aneinander ausgerichtet, um Korrelationsanalysen zwischen äußerer und interner Messung zu ermöglichen. Durch die externe Applizierung von LVDTs über dem zu erwartenden Schubfeld kann die Gesamtverformung eines wesentlich größeren Teiles des Schubfeldes aufgezeichnet werden. Die LVDTs wurden zusätzlich lotrecht auf den erwarteten Schubriss ausgerichtet. Dadurch reagieren sie sensibler auf Schubverformungen und sind weniger sensibel gegenüber Verformungen, hervorgerufen durch Biegerisse [9].

Zusätzlich wurden LVDTs oder Lasersensoren an der Unterseite der Träger und bei den T-Trägern an der oberen Außenseite der Flansche angebracht, um die vertikale Verschiebung der Träger zu überwachen. Im Zuge der ersten Versuche, die noch ausschließlich mit konventioneller Messtechnik durchgeführt wurden, war es notwendig, die Rissentwicklung durch visuel-

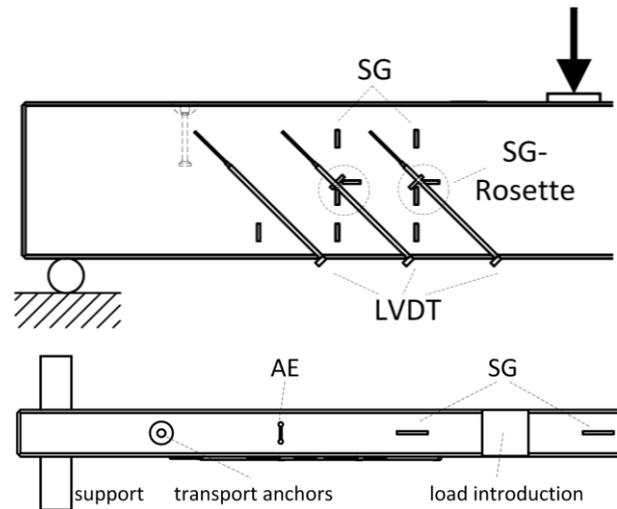


Abbildung 2. Seitenansicht und Draufsicht des Versuchsträgers mit externer messtechnischer Bestückung

Praxis leicht gangbarer Weg. Diese können sowohl extern auf der Betonoberfläche aufgetragen oder intern auf den Bewehrungsseisen appliziert werden. Während der Messbereich von DMS eher verhältnismäßig klein ist, was vor allem bei der Anwendung auf der heterogenen Betonoberfläche von Nachteil ist, lässt sich mit sog. Induktiven Wegaufnehmern (Linear Variable Differential Transformer LVDT) die Gesamtverformung eines weitaus größeren Bereiches erfassen (Marx, et al., 2011) (Schacht, et al., 2013).

Im Schubfeld wurden auf der Betonoberfläche DMS appliziert, teilweise in einer rosettenartigen Anordnung, um die Hauptspannungen und deren Neigung in dem Bereich der Rosette zu ermitteln (siehe Abbildung 2). Im Inneren des Trägers wurden im Bereich des Schubfeldes auf einem extra dafür angefertigten Bewehrungsgitter mit Stabdurchmessern von 6 mm interne DMS installiert (siehe Abbildung 3). Die externen und internen DMS wurden in ihrer x/z-Position aneinander ausgerichtet, um Korrelationsanalysen zwischen äußerer und interner Messung zu ermöglichen. Durch die externe Applizierung von LVDTs über dem zu erwartenden Schubfeld kann die Gesamtverformung eines wesentlich größeren Teiles des Schubfeldes aufgezeichnet werden. Die LVDTs wurden zusätzlich lotrecht auf den erwarteten Schubriss ausgerichtet. Dadurch reagieren sie sensibler auf Schubverformungen und sind weniger sensibel gegenüber Verformungen, hervorgerufen durch Biegerisse [9].

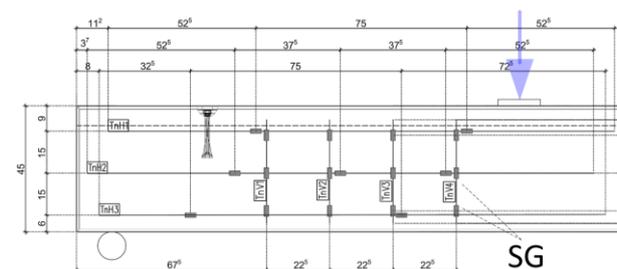


Abbildung 3. Interne DMS auf zusätzlichem Bewehrungsgitter

le Inspektionen und manuelle Messungen zu dokumentieren. In späterer Folge konnte dies dann zunehmend durch den Einsatz von DIC ersetzt werden.

3. Versuchsergebnisse und -auswertungen

3.1 Lastaufnahmekapazität

Die Ergebnisse beider Testreihen sind in Tabelle 1 zusammengefasst. Die gemessene Last zum Zeitpunkt der ersten Biegerisse wird mit F_{BC} bezeichnet. Die zum Zeitpunkt des Überganges von Biege- zum Querkraftversagen ermittelte Last wird mit F_{SF} angegeben. F_{max} ist die Last zum Zeitpunkt des Strukturversagens. $V_{SF/max}$ ist die jeweils aus $F_{SF/max}$ rückgerechnete Querkraft.

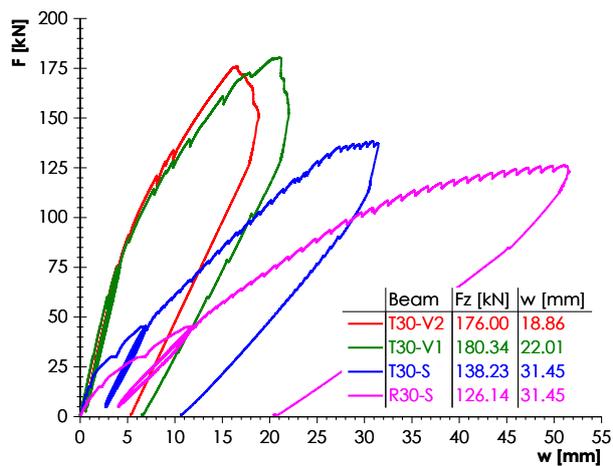


Abbildung 4. Kraft-Weg-Verlauf der 1. Testreihe



Abbildung 5. T-Träger nach dem Querkraftversagen

Abgesehen von den unterschiedlichen Trägerquerschnitten (Rechteck- oder T-Profil) und der Bewehrungsführung (mit oder ohne Vorspannung) ist die Lastaufnahmekapazität aufgrund der gleichen Profilbreite und Betondruckfestigkeit zunächst abhängig von der Trägerhöhe.

Abbildung 4 stellt die ermittelten Kraftverschiebungskurven der Träger dar, die in der ersten Versuchsreihe mit einer Profilhöhe von $h=300$ mm getestet wurden. Folgt man dem Kurvenverlauf der T-Träger, wird offensichtlich, dass der Träger ohne Vorspannung (T30-S) eine geringere Querkraftkapazität und Steifigkeit aufbringt. Ferner zeigt die Grafik, dass der Unterschied in der Maximallast und Steifigkeit zwischen 100% Vorspannkraft (T30-V2) und 50% (T30-V1) vernachlässigbar erscheint. Die erreichte Traglast beim vollvorspannten Träger

Tabelle 1. Versuchsergebnisse

Spcm	F_{BC} [kN]	F_{SF} [kN]	V_{SF} [kN]	F_{max} [kN]	F_{SF}/F_{max}	V_{max} [kN]
T30_V2	75	120	100	176,0	68,2%	144,8
T30_V1	60	122	102	180,3	67,7%	148,2
T30-S	15	55	49	138,2	39,8%	114,7
R30-S	15	54	45	126,1	42,8%	102,0
R45-S	60	130	92	265,4	49,0%	185,9
R45-V1	90	130	92	286,8	45,3%	200,8
R45-V2	90	130	92	309,9	42,0%	216,9
R60-V2	150	185	113	371,9	49,7%	225,5

(T30-V2) ist sogar geringfügig kleiner ausgefallen als beim Träger mit der halben Vorspannkraft (T30-V1). In diesem speziellen Fall wird dies jedoch auf die Streuungen zurückgeführt. Alle Träger erreichten das Querkraftversagen mit einem für diese Versagensart typischen Rissbild (siehe Abbildung 5). Beim nicht-vorgespannten Rechteckträger (R30-S), der mit der gleichen Bewehrung ausgestattet war wie die vorgespannten Träger, wurde fast die gleiche Bruchlast erreicht wie beim nicht vorgespannten T-Träger (T30-S). Allerdings kam es bei diesem Träger zu einem vorzeitigen Biegeversagen, obwohl sich das kritische Rissbild des Querkraftversagens bereits ausgebildet hatte. Die Träger T30-S und R30-S zeigen, dass die dünnen Flansche der T-Träger deren Querkrafttragfähigkeit kaum signifikant verbessern.

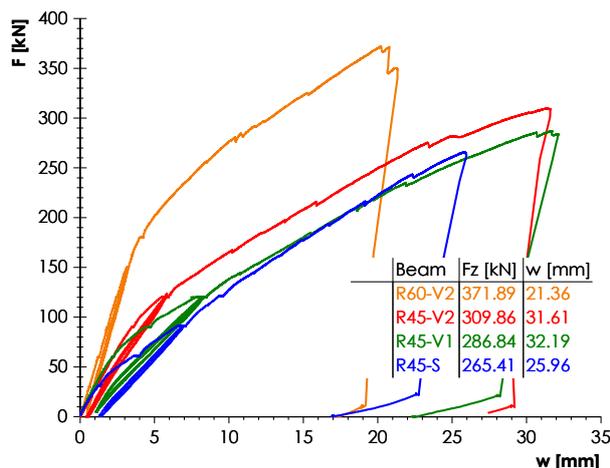


Abbildung 6. Kraft-Weg-Verlauf der 2. Testreihe



Abbildung 7. Rechteckträger nach dem Querkraftversagen

Abbildung 6 zeigt die Kraftverschiebungskurven der Träger aus der 2. Testreihe. Hier wurden Trägerhöhen von 450 und in einem Fall von 600 mm verwendet. Um ein erneutes vorzeitiges Biegeversagen zu vermeiden, wurde in dieser Testreihe beim schlaffbewehrten Träger (R45-S) die doppelte Biegebewehrung eingelegt wie bei den vorgespannten Trägern (R45-V1/2). Vergleicht man die vorgespannten Träger (R45-V1/2), so wird erneut deutlich, dass der Unterschied in der Lastaufnahmekapazität beim Querkraftversagen relativ klein ausfällt. Erwartungsgemäß erreicht diesmal jedoch der Träger mit der vollen Vorspannung (R45-V2) eine höhere Maximallast als der Träger mit der halben Vorspannung (R45-V1).

3.2 Sensor Sensitivität

Um die unterschiedlichen Messsysteme bezüglich ihrer Eignung für ein entsprechendes Monitoring-system evaluieren zu können, ist vorerst deren Sensitivität bezüglich der Erfassung der versagens-typischen Strukturveränderungen zu analysieren.

Die Sensitivität der verschiedenen Messsysteme lässt sich ermitteln, indem man deren Messdaten anhand der unterschiedlichen Kurvenverläufe analysiert. Das Verhalten von Strukturen unter Querkraftbeanspruchung ist hochgradig nichtlinear. Ein Grund dafür sind die Umlagerungen des Kraftflusses im Inneren der Struktur, hervorgerufen durch den Ausfall einzelner Tragelemente (z.B. Risse im Beton), bis sich letztlich das versagenstypische Sprengwerk zwischen Lasteinleitung und Auflager gebildet hat und in weiterer Folge bis zu dessen Versagen. Falls der Sensor ausreichend sensitiv ist, sollte er die genannten Umlagerungen, die zu anfangs noch geringen Systemverformungen führen, frühzeitig erfassen. Dies wird im Kurvenverlauf des Sensors sichtbar, durch abrupte Änderungen des Steigungsverhaltens bzw. durch Sprünge im Kurvenverlauf. Geringe Änderungen im Steigungsverhalten können durch die Ermittlung der numerischen Ableitung des Sensorverlaufs (1) herausgearbeitet werden.

$$\begin{pmatrix} y' \\ x' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{y_{n+1} - y_n}{x_{n+1} - x_n} \\ \frac{x_{n+1} - x_n}{2} \end{pmatrix} \quad (1)$$

Abbildung 8 zeigt den Kurvenverlauf von den seitlich über dem Schubfeld applizierten induktiven Wegaufnehmern (LVDT) (vergleiche Abbildung 2). Die vertikale gestrichelte Linie stellt den möglichen Anfangspunkt (SF) vom sich einstellenden Querkraftversagen dar. Hierzu ist anzumerken, dass der Übergang vom Biege- zum Querkraftversagen weniger an einem bestimmten Punkt festgemacht werden kann, als dass er vielmehr die Folge fortschreitender Umlagerungen innerhalb des Gesamtschädigungsverlaufes ist. Für weitere Analysen ist es von Vorteil, den Transformationsprozess vom Biege- zum Querkraftversagen auf einen Punkt (SF) zu reduzieren. Hierfür wurde der Anfangs- und Endpunkt einer jeden Singularität ermittelt. Die Größe der Singularitäten diene als Maß für die Sensitivität eines jeden Sensors. Ferner floss sie als Gewichtungsfaktor in die Ermittlung von FC als gewichtetes Mittel über alle Sensoren mit ein. Letztlich treten alle Singularitäten bei jedem sensitiven konventionellen Sensor in einem schmalen Zeitbereich um SF auf. Durch einen Vergleich vom ermittelten SF mit den visuellen Inspektionen bzw. den DIC-Auswertungen konnte SF als der angenommene Startpunkt für das sich einstellende Querkraftversagen bestätigt werden.

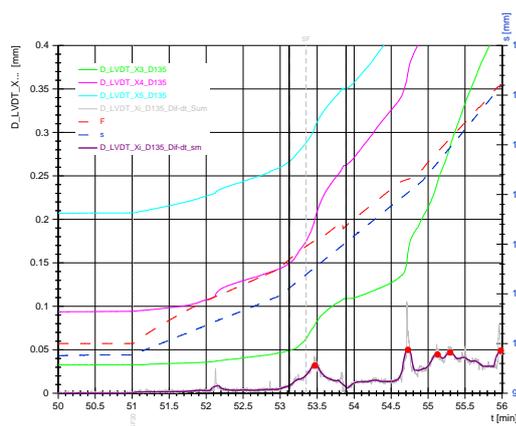


Abbildung 8. LVDT Sensorverläufe mit kumulierter Ableitung (R45-V1, ULS-level)

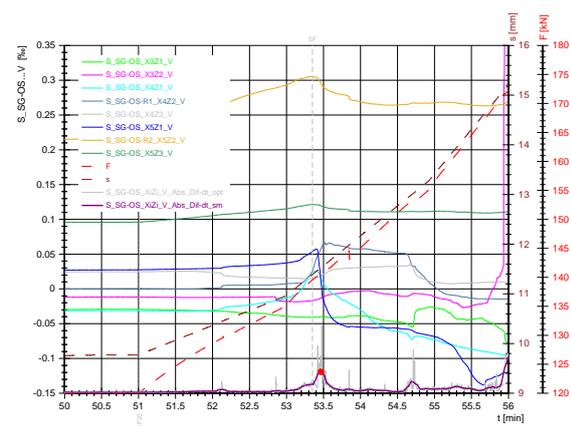


Abbildung 9. Externe vertikal orientierte DMS mit kumulierter Ableitung (R45-V1, ULS-level)

Im unteren Bereich der Grafiken (8 und 9) sieht man die über allen Sensoren gleichen Typs und gleicher Orientierung kumulierten Ableitungen. Ein Peak in der Ableitung steht für eine abrupte Änderung im Sensorverlauf, die durch eine erfasste Verformung infolge einer Umlagerung, aber auch durch Störungen verursacht werden kann. Um etwaige Störungen weitestgehend auszuschließen, müssen die erstellten Peakmuster der unterschiedlichen Sensoren abgeglichen werden. Treten Peaks über mehrere Sensoren immer im gleichen Bereich auf, ist von der gleichen Ursache auszugehen, was die Wahrscheinlichkeit einer erfassten Umlagerung erhöht. Zusätzlich wird die Plausibilität dadurch erhöht, indem mit unterschiedlichen Messsystemen an unterschiedlichen Stellen gemessen wird. Die gleichen Umlagerungen können dann mit unterschiedlicher Intensität mehrfach, hingegen Störungen in der Regel nur von einem Sensor bzw. Messsystem erfasst werden. Laborbedingungen erlauben zusätzlich die Validierung der praxisaffinen konventionellen Messsysteme (z.B. SG oder LVDT) durch moderne Messsysteme (DIC, AE, Ultraschall UE) oder schlicht durch visuelle Inspektionen.

Anstatt jeden Sensor einzeln auszuwerten, was unter praktischen Bedingungen, wo oft eine Vielzahl von Sensoren notwendig ist, sehr aufwendig werden kann, ermöglicht die Kumulation der Sensordatenableitungen eine zusammenfassende Auswertung von mehreren Sensoren auf einmal. Da in der Praxis die Störanfälligkeit weitaus größer ist als unter Laborbedingungen, empfiehlt es sich, die Kumulation mit statistischen Verfahren im Vorfeld im Zuge der digitalen Signalverarbeitung zu kombinieren, um Störungen weitestgehend zu eliminieren. Die somit aufbereiteten Daten eignen sich dann gut u.a. für Langzeit-Monitoringsysteme, z.B. zur Überwachung von Brücken. Dabei erlaubt das Verfahren im Vorfeld die Festlegung von Triggerniveaus. Solange z.B. die Peaks der kumulierten Ableitungen ein bestimmtes Niveau nicht überschreiten, ist der Schädigungsprozess noch nicht in ein kritisches Stadium übergegangen.

Durch die Ermittlung von SF als den angenommenen Startpunkt für Querkraftversagen ist es möglich, das dazugehörige Lastniveau F_{SF} zu bestimmen. Die bisherigen Auswertungen (siehe Tabelle 1) ergaben dabei einen Abstand von ca. 50% von F_{SF} bis zum Erreichen der Bruchlast F_{max} . Für spätere Anwendungen des adaptierten Verfahrens in Monitoringsystemen kann auf der einen Seite SF automatisch durch das Überschreiten eines bestimmten Triggerniveaus detektiert werden. Auf der anderen Seite hat man mit SF einen Schädigungsindikator, welcher einen ausreichenden Sicherheitsabstand zum kritischen Strukturversagen aufweist.

4. Zusammenfassung und Ausblick

Bisher wurden 8 Querkraftversuche an teilweise vorgespannten Einfeldträgern mit unterschiedlichen Querschnitten durchgeführt, um u.a. die Eignung von verschiedenen Mess- und Datenanalyseverfahren für Monitoringsysteme zur Überwachung des Querkraftversagens zu untersuchen. Die Tests selber führten zu dem querkrafttypischen Versagensbild kurz vor Erreichen der Maximallast.

Die bisher durchgeführten Sensitivitätsstudien zu den verwendeten Messsystemen erbrachten eine charakteristische Sensitivität gegenüber den Strukturveränderungen in nahezu jeder Belastungsstufe, bis hin zum abschließenden Querkraftversagen. Die Auswertung der Daten von den Sensoren, welche

gegenüber Strukturveränderungen, hervorgerufen durch das Querkraftversagen, besonders sensitiv waren, zeigt eine Möglichkeit auf, diese Versagensart bereits in einer frühen Phase ab ca. 50% von der endgültigen Versagenslast zu erkennen. Diese frühzeitige Erkennung ermöglicht auf der einen Seite das Einleiten von gezielten Gegenmaßnahmen und führt auf der anderen Seite zu einem ausreichenden Sicherheitsabstand bis zum endgültigen Strukturversagen. Bevor diese Systeme im Rahmen von Monitoringsystemen zur Überwachung von realen Bauwerken verwendet werden können, sind noch weitere Anpassungen notwendig. In einem nächsten Schritt ist das Sensorlayout zu optimieren, um die Sensoren soweit wie möglich auf diejenigen zu reduzieren, die gegenüber Querkraftversagen sensitiv sind. Jedoch ist eine ausreichende Sensorredundanz vorzuhalten, um Störungen oder Sensorausfälle, welche in-situ viel häufiger auftreten können als unter Laborbedingungen, kompensieren zu können. Darüber hinaus ist es erforderlich, die Prozesse der Signalverarbeitung bzw. Datenanalyse soweit zu optimieren, dass diese weitgehend automatisierbar sind und somit auch bei einer weitaus höheren Sensoranzahl die ökonomischen Anforderungen erfüllen.

Das Projekt ist noch nicht abgeschlossen, gegenwärtig steht die Auswertung der modernen Messverfahren (z.B. DIC) im Fokus. Anhand dieser können die konventionellen Messmethoden verifiziert und weiter optimiert werden. Nachdem dies abgeschlossen ist, soll der Auswertprozess so weit wie möglich automatisiert und in ein Computerprogramm überführt werden, das dann auf alle untersuchten Träger angewendet werden kann. Dieses Programm bildet neben der Hardware, die u.a. aus den Sensoren besteht, den Kern eines auf Querkraftversagen spezialisierten und auf reale Tragwerke übertragbaren Monitoringsystems.

Literaturliste/ Quellenverzeichnis:

Görtz, S., 2004. *Zum Schubrissverhalten von Stahlbeton- und Spannbetonbalken aus Normal- und Hochleistungsbeton*, Aachen: RWTH Aachen.

Marí, A. et al., 2014. Shear-flexural strength mechanical model for the design and assessment of reinforced concrete beams, *Structure and Infrastructure Engineering. Maintenance, Management, Life-Cycle Design and Performance*, DOI: 10.1080/15732479.2014.964735 (21 pp.).

Marx, S. et al., 2011. *Versuchsgrenzlastindikatoren bei Belastungsversuchen*, Dresden: TU Dresden.

Randl, N. & Kunz, J., 2009. Biegeschubversuche an Stahlbetonbalken mit nachträglich eingemörtelter Querkraftbewehrung. *Beton- und Stahlbetonbau*.

Ruiz, M., Muttoni, A. & Sagaseta, J., 2015. Shear strength of concrete members without transverse reinforcement: A mechanical approach to consistently account for size and strain effects. *Engineering Structures* 99, Band pp. 360-372.

Schacht, G., Bolle, G. & Marx, S., 2013. Messen bei Querkraftversuchen. In: *Beton- und Stahlbetonbau*. Berlin: Ernst & Sohn, pp. 875-887.

Sigrist, V. et al., 2013. Background to the fib Model Code 2010 shear provisions – part I: beams and slabs. *Structural Concrete*, Volume 14, Issue 3 (pages 195–203).

Zink, M., 2000. *Zum Biegeschubversagen schlanker Bauteile aus Hochleistungsbeton mit und ohne Vorspannung*. Stuttgart: Teubner.