

Ein ganzheitliches Querkraftmodell für Stahlbetonbauteile ohne und mit Querkraftbewehrung?

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Nguyen Viet Tue (TU Graz)

Dr.-Ing. Nguyen Duc Tung (TU Graz), Dipl.-Ing. Christoph Betschoga (TU Graz)

Dipl.-Ing. Rainer Ehmann (BAW)

Basierend auf der Analyse der Auswirkung der Bewehrung bei der Fortpflanzung des kritischen Schubrisses wurde im Rahmen der Zusammenarbeit zwischen TU Graz und BAW ein ganzheitliches Querkraftmodell für Stahlbetonbauteile ohne und mit Querkraftbewehrung entwickelt. Die Beiträge der einzelnen Querkraftanteile ab der Schubrissbildung werden quantitativ ermittelt und somit die Rolle der Querkraftbewehrung, die kleiner als die Mindestquerkraftbewehrung ist, auf die Erhöhung der Querkrafttragfähigkeit verdeutlicht. Mit diesem Modell kann ein allgemeines Bemessungskonzept für die Querkraft erarbeitet werden.

1. Einleitung

Im Allgemeinen wird in Bezug auf die Querkrafttragfähigkeit davon ausgegangen, dass das Versagen bei Bauteilen ohne Querkraftbewehrung von einem kritischen Schubriss (Bild 1, links) und bei Bauteilen mit Querkraftbewehrung durch Bruch der Zug- oder Druckstrebe (Bild 1, rechts) bestimmt wird. Für die Bemessung von Bauteilen mit Bewehrung wird deshalb in der Regel ein parallelgurtiges Fachwerk zugrunde gelegt, während für Bauteile ohne Bewehrung ein halbempirisches Modell verwendet wird. Voraussetzung für die Anwendung des Fachwerksmodells ist, dass der Querkraftbewehrungsgrad im betrachteten Bauteil größer als die sog. Mindestquerkraftbewehrung ist. Mit anderen Worten bedeutet dies, dass das Rissbild im Bruchzustand infolge der Querkraft ab einer Bewehrung entsprechend der Mindestbewehrung ähnlich wie jenes in Bild 1, rechts ist und eine Querkraftbewehrung kleiner als die Mindestquerkraftbewehrung nicht zu einer Erhöhung der Querkrafttragfähigkeit beiträgt.

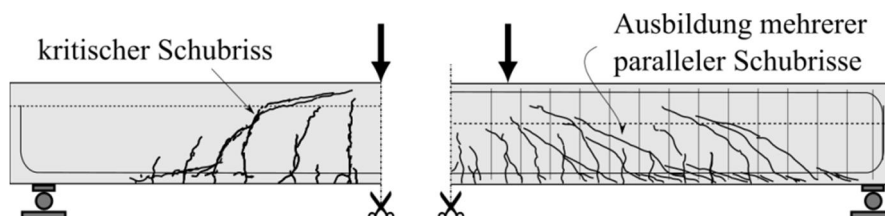


Bild 1: Rissbild im Bruchzustand bei Bauteil mit und ohne Querkraftbewehrung [1]

Versuche mit Querkraftbewehrung in verschiedenen Forschungsinstituten zeigen jedoch, dass zum einen das Versagen von Versuchskörpern mit einer Bewehrung oberhalb der Mindestquerkraftbewehrung weiterhin von einem kritischen Schubriss bestimmt wird (Bild 2, links) und zum anderen nicht selten eine nennenswerte Tragfähigkeitsverbesserung bereits bei Versuchskörpern mit einer Bewehrung deutlich geringer als die Mindestbewehrung erzielt werden kann (Bild 2, rechts). Diese Beobach-

tungen sind vor allem für die Nachrechnung und Verstärkung von bestehenden Bauteilen sehr interessant, da zum einen die Querkraftbewehrung in alten Stahlbetonbauteilen oftmals kleiner als die heutige Mindestbewehrung ist und zum anderen die Verankerung der neu einzubauenden Querkraftbewehrung einfacher realisiert werden kann, wenn der kritische Schubriss weiterhin maßgebend für das Versagen ist.

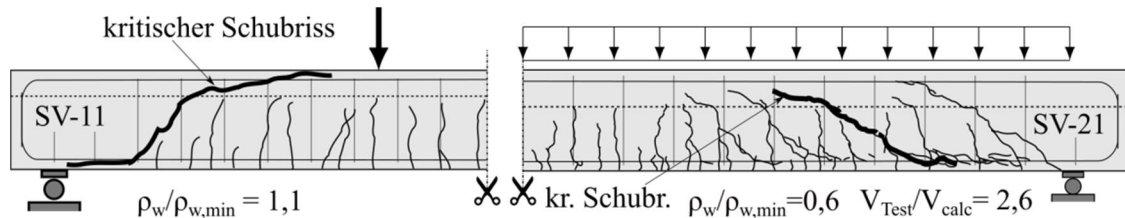


Bild 2: Rissbild und Traglaststeigerung bei Bauteile mit Querkraftbewehrung [1]

Vor diesem Hintergrund wurde am Institut für Betonbau der TU Graz ein ganzheitliches Modell zur Beschreibung der Querkrafttragfähigkeit entwickelt. In diesem Beitrag wird die Betrachtung für Bauteile ohne und mit geringer Querkraftbewehrung vorgestellt. Weitere Einzelheiten können [1] entnommen werden.

2. Schubfeldtypen und Versagensstelle

Inzwischen gilt als sicher, dass die Biegebeanspruchung einen nennenswerten Einfluss auf die Querkrafttragfähigkeit hat. Das Verhältnis zwischen Biege- und Querkraftbeanspruchung (M/V) kann somit verwendet werden, um verschiedene Schubfeldtypen zu charakterisieren.

Entsprechend [2] können alle in der Praxis relevanten statischen Systeme und Belastungen in drei Schubfeldtypen eingeteilt werden:

- Schubfeldtyp 1: konstante Querkraft mit abnehmendem Biegemoment (Einfeldträger unter Einzellast); die meisten bisherigen Querkraftversuche wurden mit diesem Schubfeldtyp durchgeführt
- Schubfeldtyp 2: zunehmende Querkraft mit abnehmendem Biegemoment (Einfeldträger unter Gleichstreckenlast); Versuche mit diesem Schubfeldtyp sind deutlich seltener als Versuche des Typs 1.
- Schubfeldtyp 3: zunehmende Querkraft mit zunehmendem Biegemoment (Kragarm unter Gleichstreckenlast); für diesen Typ sind kaum Versuche vorhanden.

Bei einem Durchlaufträger können gleichzeitig verschiedene Schubfeldtypen auftreten (Bild 3). Die Vorhersage der Versagensstelle ist somit bei Durchlaufsystemen nicht so einfach. Sie kann nur zuverlässig ermittelt werden, wenn die Kapazität über die gesamte Balkenlänge ermittelt wird. Der Querschnittsnachweis reicht in der Regel nicht aus.

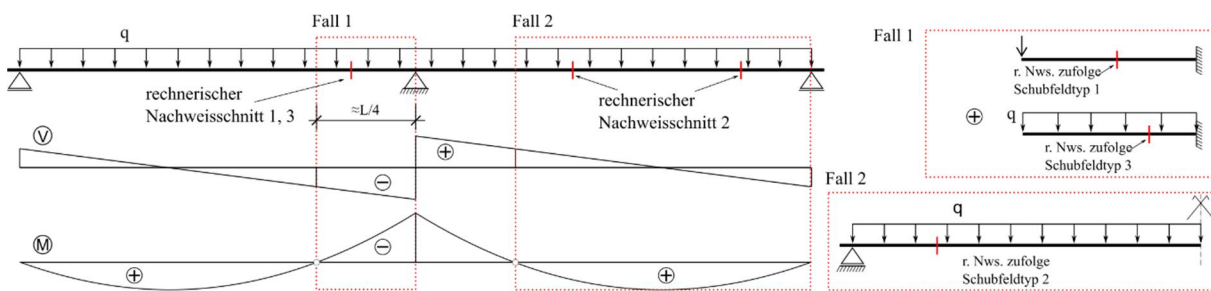


Bild 3: Mögliche Versagensstellen bei einem Durchlaufträger

3. Bildung des kritischen Schubrisses

Um Übersichtlichkeit zu haben, wird im Folgenden nur der Schubfeldtyp 1 betrachtet. Die hier beschriebenen Zusammenhänge können ohne weiteres auf andere Schubfeldtypen übertragen werden. Der kritische Schubriss entwickelt sich im Allgemeinen aus dem letzten auftretenden Biegeriss im auflagernahen Bereich mit geringer Momentenbeanspruchung – eine detaillierte Modellbeschreibung für dieses Verhalten wird in [2] gegeben.

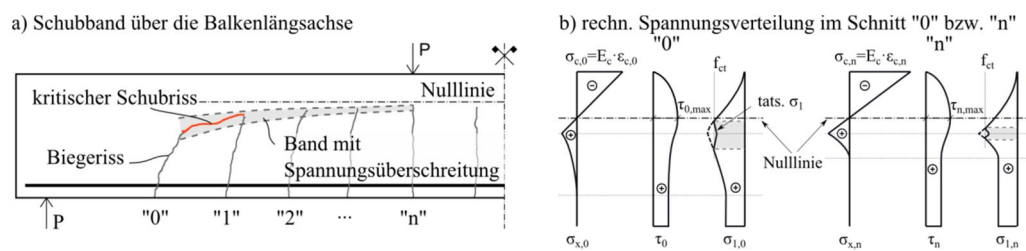


Bild 4: Schematische Darstellung des Schubbandes mit Bildung des kritischen Schubrisses

Geht man von einer Schubspannung nach Mörsch [3] aus, so kann daraus, unter Berücksichtigung der Normalbetonzugspannung im Bereich der Risspitze, die Hauptspannungsverteilung am Querschnitt berechnet werden – siehe Bild 4b. Daraus ergibt sich in Umgebung der Risspitze ein Bereich, in dem die berechnete Hauptspannung die Betonzugfestigkeit erreicht. Die Breite dieser Bereiche nimmt mit zunehmender Momentenbeanspruchung jedoch ab – siehe Bild 4a. Entlang der Balkenlängsachse bildet sich somit ein sog. Schubband. Ein kritischer Schubriss wird gebildet, sobald dieses Schubband eine gewisse Breite erreicht und zwei benachbarte Biegerisse verbindet.

4. Einfluss der Bewehrung bei Rissfortpflanzung

Ohne Bewehrung würde bei schubslanken Bauteilen die Bildung des kritischen Schubrisses ein unmittelbares Versagen bedeuten, wenn danach die Bildung eines Sprengwerks nicht möglich ist. Das Schubversagen eines Bauteils ohne Schubbewehrung ist deshalb im Allgemeinen ein sprödes Versagen.

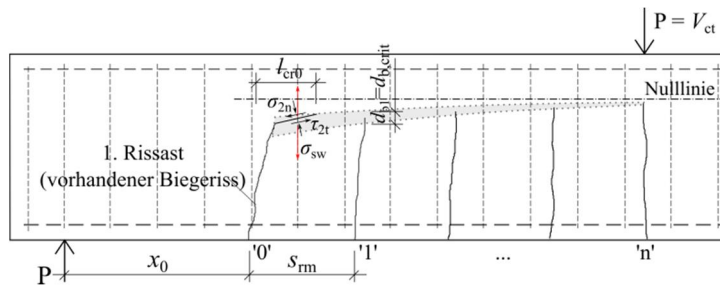


Bild 5: Rissbildung bei Balken mit Querkraftbewehrung

Bei Vorhandensein einer Bewehrung wird der zweite Rissast durch zwei Effekte gesteuert. Zum einen nimmt die Bewehrung durch die Rissöffnung eine bestimmte vertikale Kraft auf. Zum anderen entsteht durch die Aktivierung der Bügelkraft eine Normalspannung auf die Oberfläche des 2. Rissastes. Durch das Vorhandensein dieser Normalkraft wird eine Querkraftaufnahme infolge Rissreibung ermöglicht, siehe Bild 5. Aufgrund der vorhandenen Risskinematik geht mit der stabilen Fortpflanzung des 2. Rissastes eine gleichzeitige Erhöhung der Rissgleitung einher. Dadurch kann der Traganteil infolge Kornverzahnung vergrößert werden.

5. Ermittlung der Anteile

Die Querkraftanteile bei unterschiedlichen Lastniveaus können anhand eines Freikörpers, der aus dem ersten Riss geschnitten ist, untersucht werden, siehe Bild 6. Anhand eines Gleichungssystems von Gleichgewichtsbedingungen am Freikörper, geometrischen Bedingungen und konstitutiven Beziehungen können die Rissfortpflanzung und die Traganteile bei zunehmender Querkraft beschrieben und ermittelt werden.

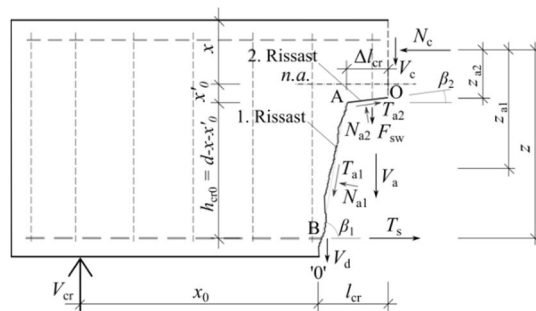


Bild 6: Gleichgewicht am freigeschnittenen Element bei Erreichen der Schubrislast

Gleichgewichtsbedingungen: Die wirkende Querkraft V steht im Gleichgewicht mit den vertikalen Kräften, die sich durch unterschiedliche Mechanismen ergeben:

$$V = V_c + V_a + V_d + F_{sw}$$

Dabei sind V_c , V_a , V_d , F_{sw} die Querkraftanteile, die vom ungerissenen Beton, der Rissuferverzahnung, der Dübelwirkung der Längsbewehrung und der Zugkraft in den Biegeln aufgenommen werden. Wei-

terhin werden die Beziehungen zwischen den einzelnen Kraftanteilen durch Analyse der Spannungszustände am Rissufer des zweiphasigen Biegeschubrisses hergeleitet.

Geometrische Bedingungen: Zur Beschreibung der relativen Bewegungen der gegenüberliegenden Rissoberflächen an der Stelle der Biegebewehrung (Punkt B in Bild 7) wird eine Drehung von zwei starren Körpern um die Risspitze angenommen. Am oberen Bereich des ersten Schubrissastes (Punkt A) wird zusätzlich zur Drehung eine Verschiebung entlang der Risskante angenommen, damit Schubspannungen über den zweiten Schubrissast übertragen werden können.

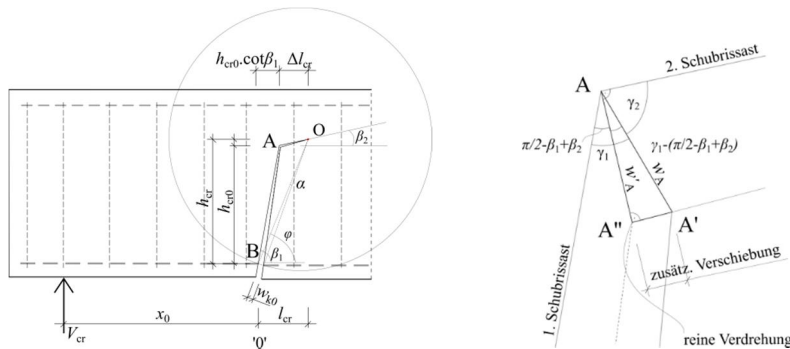


Bild 7: Geometrische Bedingungen des Biegeschubrisses

Konstitutive Beziehungen: Aus der angenommenen Risskinematik werden die Querkraftanteile anhand der folgenden konstitutiven Beziehungen bestimmt:

- *Spannungs-Rissöffnungsbeziehung in der Querkraftbewehrung*: Die aktivierten Spannungen in der Querkraftbewehrung werden durch die Rissöffnung und die Verbundeigenschaften zwischen Stahlbügeln und Beton bestimmt. Dabei wird ein starrplastisches Verbundverhalten nach Sigrist [4] berücksichtigt.
- *Rissuferverzahnung*: Zur Bestimmung der Schub- und Normalspannungen infolge der Rissuferverzahnung in Abhängigkeit der Rissöffnung und -gleitung wird das Modell von Gambarova und Karakoc [5] verwendet.
- *Dübelwirkung*: Die Querkraftkomponente aus der Dübelwirkung der Längsbewehrung wird unter Verwendung der Dübelkraft-Verformungsbeziehung nach Baumann und Rüsç [6] ermittelt.

Lösungsmethode: Für die Bestimmung der Entwicklung des zweiten Schubrissastes und der Aktivierung der Querkraftbewehrung ist eine iterative Berechnung erforderlich. Bild 8 zeigt qualitativ die Ergebnisse der Analyse für die Normal- und Schubspannungen infolge der Rissuferverzahnung sowie die Schubspannungen im ungerissenen Beton.

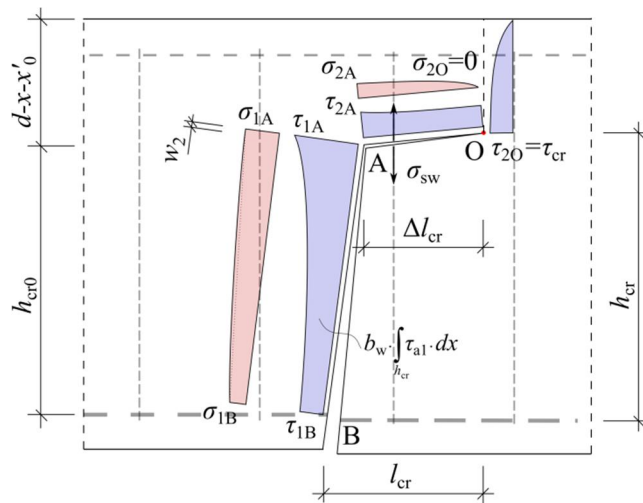


Bild 8: Verteilung der Normal- und Schubspannungen infolge der Rissuferverzahnung und des ungerissenen Betons

Relative Beiträge der Einzelquerkraftanteile Bild 9 zeigt als Beispiel die Ermittlung der verschiedenen Traganteile eines Balkens mit Querkraftbewehrung. Bei Erreichen der Schubrislast V_{cr} sind die wesentlichen Mechanismen der Querkraftabtragung zum einen der Querkraftanteil des ungerissenen Betons V_c und zum anderen der Querkraftanteil der Rissuferverzahnung V_a . Bei geringer Öffnung des Schubrisses ist der Anteil der Bügel gering. Sie dienen vor allem der Steuerung der Rissöffnung, um eine Kraftabtragung am Rissufer zu ermöglichen.

Bei weiterer Laststeigerung muss sich der Schubriss weiter öffnen und in Richtung der Druckzone fortpflanzen. Dadurch ergibt sich eine zunehmende Rissgleitung und ermöglicht somit eine höhere Lastabtragung infolge Kornverzahnung am ersten Schubrissast bei erhöhter Belastung. Durch die vorhandenen Betondruckspannungen in der Druckzone wird die Fortpflanzung des schrägen Schubrisses an der rechnerischen Nulllinie gebremst und eine Einschnürung der Druckzone verhindert.

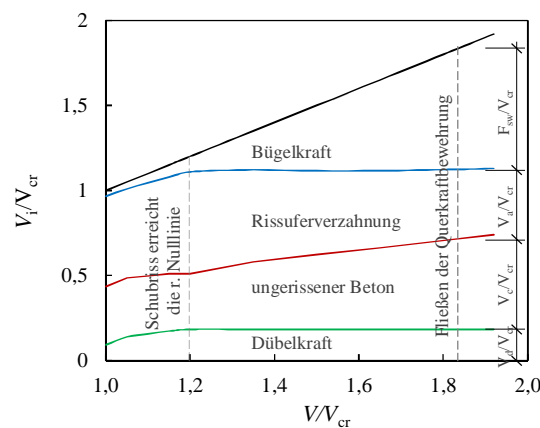


Bild 9: Querkraftanteile aus verschiedenen Mechanismen bei unterschiedlichen Belastungsniveaus für einen querkraftbewehrten Balken

Nach dem Erreichen der rechnerischen Nulllinie tritt bei weiterer Laststeigerung nur mehr eine zunehmende Rissöffnung ein. Als Folge nimmt die Kraft in den Bügeln F_{sw} deutlich zu, während der Querkraftanteil aus der Rissuferverzahnung V_a abnimmt. Die Summe der Querkraftanteile V_c , V_a und V_d bleibt jedoch annähernd konstant. Diese Querkraftanteile bilden in Summe den Betonanteil V_{RC} . Bei entsprechender Höhe der Querkraft kommt es zum Fließen der Bewehrung. Die maximale Kraft in den Bügeln stellt den Stahlanteil bei Stahlbetonbauteilen mit geringer Querkraftbewehrung dar, wobei das Versagen durch die Bildung und Fortpflanzung des kritischen Schubrisses gekennzeichnet ist.

Ganzheitliche Beschreibung des Querkrafttragverhaltens: Bei Bauteilen mit sehr hoher Querkraftbewehrung können mehrere parallele Schubrisse gebildet werden, bevor es zum Fließen der Querkraftbewehrung am kritischen Schubriss kommt. In diesem Fall kann von einem Tragverhalten analog jenem eines Fachwerks ausgegangen werden. Jener Bewehrungsgrad, bei dem der Querkraftwiderstand auf Grundlage der Fachwerkanalogie maßgebend wird, bildet eine Grenze für die Betrachtung von Bauteilen mit geringer oder hoher Querkraftbewehrung. Hiermit kann der fließende Übergang zwischen Bauteilen mit und ohne Schubbewehrung mittels einer einheitlichen mechanischen Grundlage beschrieben werden.

Literatur

- [1] Tue, N.V.; Tung, N.D.; Betschoga C.: Querkrafttragfähigkeit von Stahlbetonbalken mit (geringer) Querkraftbewehrung. Forschungsbericht, 2018
- [2] Tue, N.V.; Ehmann, R.; Tung, N.V.; Betschoga C.: Schubversuche an simulierten Durchlaufbalken ohne Querkraftbewehrung. *Beton- und Stahlbetonbau 111 (2016), Heft 11, S. 738-748*
- [3] Mörsch E.: *Der Eisenbetonbau – Seine Theorie und Anwendung*, Stuttgart 1908
- [4] Sigrist, V.: Zum Verformungsvermögen von Stahlbetonträgern, ETH Zürich, Diss., 1995
- [5] Gambarova, P. G. ; Karakoc: A new approach to the analysis of the confinement role in regularly cracked concrete elements Proceedings of the 7th SMiRT Conference, 1983
- [6] Baumann, T. ; Rüschi, H.: Versuche zum Studium der Verdübelungswirkung der Biegezugbewehrung eines Stahlbetonbalkens. *DAfStb Heft 210 (1970)*.