

# Versuche und Bemessungsvorschlag zur Anrechenbarkeit von Spanngliedern auf die Torsionslängsbewehrung

R. Maurer, E. Stakalies

**ZUSAMMENFASSUNG** Die Bewertung der Tragfähigkeit von bestehenden älteren Spannbetonbrücken durch eine Nachrechnung nach heutigem Stand der Technik führt besonders bei Querkraft und Torsion in der Regel zu deutlichen rechnerischen Defiziten. Dies ist in erste Linie eine Folge der Weiterentwicklung der Bemessungsmodelle sowie der dazugehörigen Konstruktionsregeln. Zudem ist der Schwerverkehr in der Vergangenheit stetig angestiegen und wird Prognosen zufolge künftig weiter ansteigen. Die oben genannten rechnerischen Defizite betreffen die Bügel für Querkraft und Torsion sowie die Torsionslängsbewehrung. Während beim Spannbeton die Bügel bei der Querkrafttragfähigkeit durch einen relativ großen Betontraganteil aus der Druckbogenwirkung entlastet werden, ist dies, abgesehen vom Betontraganteil infolge Rissreibung, bei den Torsionsbügeln nicht der Fall. Zudem gilt das Bemessungsmodell für Torsion im EC2 für reine Torsionsbeanspruchung. Bei Spannbetonbrücken liegt aber immer eine kombinierte Beanspruchung aus Biegung, Querkraft und Torsion vor. Die näherungsweise Anwendung des Bemessungsmodells für Torsion nach EC2 bei kombinierter Beanspruchung, wobei die Biegebeanspruchung üblicherweise überwiegt, ergibt eine zutreffende Torsionsbügel- aber konservative Torsionslängsbewehrung. Vor diesem Hintergrund stellt sich die Frage nach der Anrechenbarkeit der Spannglieder auf die erforderliche Torsionslängsbewehrung. Hierzu wurden an der TU Dortmund, basierend auf Versuchen mit reiner Momenten-Querkraft-Interaktion (M+V) zusätzlich erste Versuche an Spannbeton-Durchlaufträgern mit kombinierter Beanspruchung aus Biegung, Querkraft und Torsion (M+V+T) durchgeführt. Über die Ergebnisse wird nachfolgend berichtet. Zunächst werden hierzu die Referenzversuche mit reiner Momenten-Querkraft-Interaktion vorgestellt, um die wesentlichen Unterschiede bei der Bügelbemessung für Querkraft und Torsion mit beziehungsweise ohne den bei den Querkraftversuchen festgestellten Betontraganteil herauszustellen. Dieser Betontraganteil wird von den Autoren, wie bereits in [1], [2], [3] beschrieben, primär der Druckbogenwirkung zugeschrieben, die bei vorgespannten Balken stark ausgeprägt ist. Nachfolgend wird anhand der durchgeführten Versuche mit kombinierter Beanspruchung aus Biegung, Querkraft und Torsion ein Bemessungsvorschlag überprüft, der auf theoretischen Betrachtungen, basierend auf elementaren mechanischen Grundlagen, beruht. Für eine endgültige Absicherung sind aufgrund der Vielzahl von Einflussparametern weitere Versuche erforderlich.

## Tests and design proposal for creditability of tendons as torsional longitudinal reinforcement

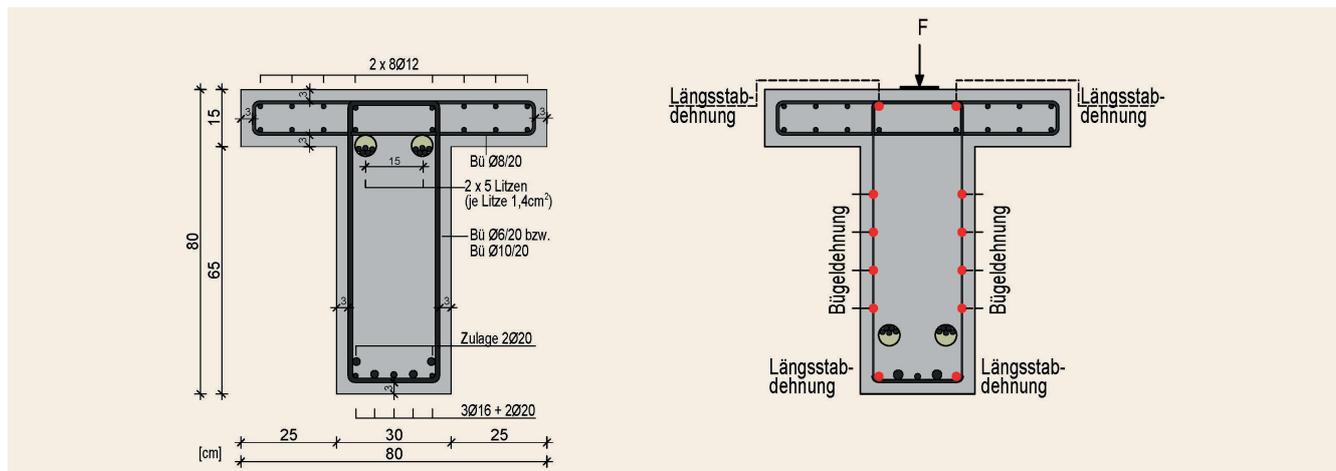
**ABSTRACT** The assessment of existing, older prestressed bridges according to current standards often leads to a significant, calculatory deficit when it comes to shear and torsion. This is mostly due to an ongoing development of design models and detailing rules as well as the adaption of material-based changes according to new research findings. The above mentioned calculatory deficit affects the stirrups for shear and torsion as well as the torsional longitudinal reinforcement. While the arch action releases a significant part of the stirrups concerning shear, this is not the case for the torsional stirrups. Furthermore, the design model for torsion according to EC2 is based on pure torsional loading, whereas prestressed concrete bridge design is always based on a combined loading of bending, shear and torsion. Thus, the design approach according to EC2 for combined loading of prestressed concrete beams with predominate bending, leads to applicable torsional stirrups but conservative longitudinal reinforcement. Hence, the question arises of taking prestressing tendons into account.

Therefore, large scale tests with a combined loading of bending, shear and torsion were carried out at TU Dortmund University. These large-scale tests were based on reference-tests with bending and shear, only. First, explicit results for these reference tests are presented, in order to highlight the difference in stirrup design for shear and torsion with and without the significant contribution of the concrete. This contribution of the concrete according to the arch action model, as presented in previous publications [1], [2], [3], has been found to be significant in prestressed concrete beams. Second, first results of the large-scale tests with combined loading of bending, shear and additional torsion are given in this article.

Furthermore, a design approach on the basis of theoretical considerations, based on elementary mechanical principles, for these large-scale tests with combined loading of bending, shear and torsion is being verified. Due to numerous influencing parameters, further large-scale tests are necessary for a final validation of the design approach.

## STICHWÖRTER

Versuche, Berechnung, Spannbetonbau, Schub, Torsion



**Bild 1.** Querschnittsabmessungen, Spanngliedlage, Bewehrung und DMS-Positionen [7], [8] *Abb.: P. Gleich*  
 Fig. 1. Cross section with dimensions, prestressing tendons, reinforcement and measuring positions [7], [8] *Source: P. Gleich*

## 1 Einleitung

### 1.1 Problemstellung

Die Bewertung der Tragfähigkeit von bestehenden älteren Spannbetonbrücken durch eine Nachrechnung nach heutigem Stand der Technik führt besonders bei Querkraft und Torsion in der Regel zu deutlichen rechnerischen Defiziten [4]. Dies ist in erster Linie eine Folge fortlaufender Anpassung der werkstoffbezogenen Bemessungsnormen an neue wissenschaftlich basierte Erkenntnisse.

So wurden die Schubnachweise für Querkraft und Torsion in den Anfängen der Spannbetonbauweise auf der Grundlage geführt, dass die Hauptzugspannungen im Beton im rechnerischen Bruchzustand bei Überschreitung festgelegter Grenzwerte durch eine Bewehrung aufzunehmen waren. Dabei wurde, wie in [5] beschrieben, rechnerisch der ungerissene Zustand I zugrunde gelegt. Durch Einführung der Nachweise im gerissenen Zustand II am idealisierten Fachwerkmodell ergaben sich deutlich größere Querkraftbewehrungsmengen [5] und die Notwendigkeit geschlossener Bügel. Das idealisierte Fachwerkmodell im Eurocode 2 [6] berücksichtigt aber nicht alle wesentlichen Traganteile, die bei Spannbetonträgern wirksam sind. Um die tatsächliche Querkrafttragfähigkeit möglichst realitätsnah bestimmen zu können, ist insbesondere der zusätzliche Betontraganteil aus der Druckbogenwirkung zu berücksichtigen. Um diesen zu quantifizieren, wurden bereits mehrere Versuche unter Momenten-Querkraft-Interaktion an vorgespannten Durchlaufträgern durchgeführt [7], [8], [9], [10], [11], [12] von denen nachfolgend Versuche aus [8] als Referenzträger für die Versuche mit kombinierter Beanspruchung aus Biegung, Querkraft und Torsion herangezogen werden.

Die in Eurocode 2 (EC2) [6] enthaltenen Bemessungsmodelle gelten für reine Torsion, ohne gleichzeitige Wirkung von Biegung und Querkraft. Damit ist eine auf der sicheren Seite liegende Bemessung der Torsionsbügel und Torsionslängsbewehrung möglich. Diese kann näherungsweise mit den für die anderen Schnittgrößen jeweils separat ermittelten Bewehrungen überlagert werden. Lediglich bei der Beanspruchung der Betondruckstreben ist nach EC2 [6] eine Interaktion zwischen Querkraft und Torsion nachzuweisen. Die Betondruckspannungen aus der Momentenbeanspruchung bleiben dabei unberücksichtigt.

Bei Betonbrücken kommt jedoch im Allgemeinen keine reine Torsionsbeanspruchung ohne gleichzeitige Biegung und Querkraft vor. Die für reine Torsion hergeleiteten Bemessungsmodelle werden näherungsweise auch bei kombinierten Beanspruchungen angewendet. Bei einer kombinierten Beanspruchung ist aber das Tragverhalten im Zustand II sehr stark abhängig vom Größenverhältnis dieser Schnittgrößen untereinander. Überwiegt zum Beispiel die Biegebeanspruchung, stellt sich eine andere Rissbildung ein als bei starker Torsionsbeanspruchung mit kleiner Biegebeanspruchung. Das Verhältnis von  $V$  zu  $T$  bestimmt, ob eine Seite frei von Schubrisen bleibt oder sich bei entsprechend großer Torsion die Neigung der Schubrisse sogar umkehrt.

Die erforderliche Torsionsbewehrung wird von der Wahl des Druckstrebenwinkels maßgeblich beeinflusst, da hier eine direkte Abhängigkeit zwischen erforderlicher Bügel- und Torsionslängsbewehrung gegeben ist. So wird die Menge der erforderlichen Bügelbewehrung bei Wahl eines flachen Druckstrebenwinkels zwar reduziert, in gleichem Zuge erhöht sich jedoch die erforderliche Torsionslängsbewehrung.

Im Rahmen von Brückennachrechnungen ergeben sich infolge einer kombinierten Beanspruchung aus Biegung, Querkraft und Torsion häufig Defizite hinsichtlich der erforderlichen Bügel- und Torsionslängsbewehrung. Dabei werden im Rahmen der Nachweisstufen 1 und 2 der Nachrechnungsrichtlinie [13] die Nachweise auf Querschnittsebene für die Schnittgrößen  $M$ ,  $V$  und  $T$  jeweils getrennt geführt und die Bewehrungen anschließend überlagert. Daraus folgt bei der Brückennachrechnung häufig ein Defizit beim Nachweis der Torsionslängsbewehrung. Daher stellt sich die Frage, in welchem Umfang nicht voll ausgenutzte Spannglieder, auch wenn sie nicht entsprechend der Theorie für reine Torsion in den Ecken des Querschnitts angeordnet sind, auf die Torsionslängsbewehrung angerechnet werden können.

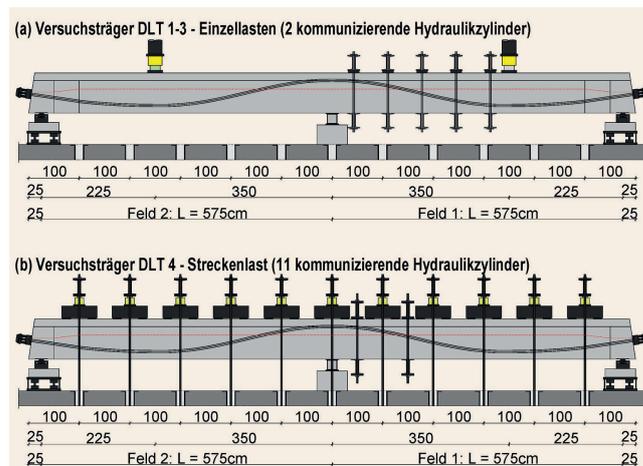
Hierzu wurden an der TU Dortmund erste Versuche an Spannbeton-Durchlaufträgern mit kombinierter Beanspruchung aus Biegung, Querkraft und Torsion ( $M+V+T$ ) durchgeführt, die mit dem nachfolgend in Abschnitt 4 beschriebenen Bemessungsvorschlag für die Torsionslängsbewehrung bei kombinierter Beanspruchung ausgelegt wurden.

## 2 Versuche an Durchlaufträgern mit reiner Momenten-Querkraft-Interaktion (M+V)

### 2.1 Versuchsprogramm

Experimentelle Untersuchungen an der TU Dortmund unter reiner Querkraftbiegung, die in [7], [8] detailliert beschrieben werden, erfolgten bisher an insgesamt vier Großversuchen mit Durchlaufträgern aus Spannbeton, die nachfolgend als Referenzträger dienen. Die variierten Einflussparameter waren dabei im Wesentlichen der Schubbewehrungsgrad ( $\rho_{w,geom}/\rho_{w,min} = 0,52$  bis  $2,32$  mit  $\rho_{w,geom} = \frac{A_{s,Bil}}{100 \cdot b_w}$ ) und die Art der Belastung (Einzellasten, Streckenlast). Die Versuchsträger hatten identische Querschnittsabmessungen und Spannliedführungen (**Bild 1, Bild 2**). Die Versuchsträger DLT 2.1 bis 2.3, wurden unter Einzellasten, der Träger DLT 2.4 unter einer Streckenlast getestet (**Bild 2**).

An jedem Versuchsträger wurden zwei Teilversuche durchgeführt. Dabei wurde jeweils kurz vor dem Versagen des Feldes mit der schwächeren Querkraftbewehrung, was sich anhand des ausgeprägten Rissbildes in Kombination mit den gemessenen Dehnungen auf den Bügelschenkeln abzeichnete, entlastet. Die Dehnungen auf den Bügelschenkeln wurden dabei in Echtzeit auf einem Monitor neben dem Versuchsträger angezeigt, sodass der kritische Zustand direkt abgeschätzt werden konnte. Als kritisch wurden dabei ausgeprägte plastische Verformungen mit Dehnungen von deutlich über 10% bis 25% betrachtet. Abschließend wurde der versagenskritische Querkraftbereich mit äußeren vorgespannten Schubspangen verstärkt. Danach wurde der Versuch bis zum Versagen des stärker bewehrten Feldes fortgesetzt. Jeder Träger war mit zwei Spannliedern mit fünf Litzen der Festigkeit St1570/1770 vorgespannt. Die Zielvorspannung im Schwerpunkt des Querschnitts betrug  $3,5 \text{ MN/m}^2$ . Zur Vermeidung eines vorzeitigen Biegeversagens bei den Querkraftversuchen musste eine relativ hohe zusätzliche Längsbewehrung aus Betonstahl eingebaut werden. Nachfolgend werden zunächst nochmals



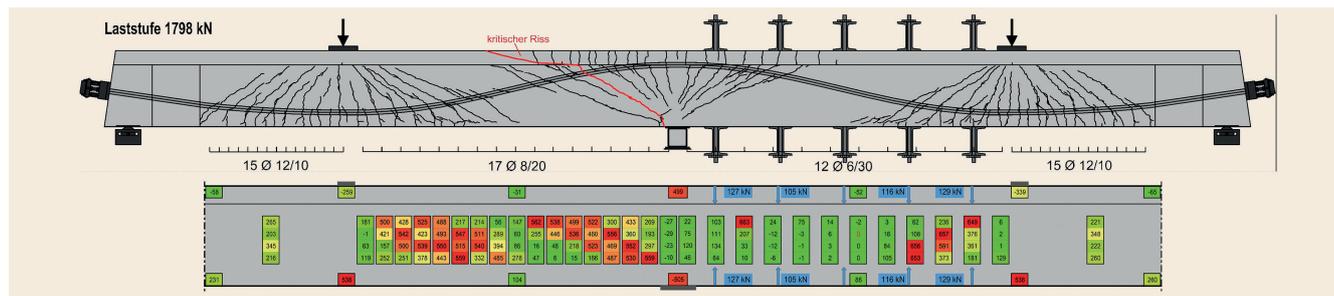
**Bild 2.** Versuchsaufbau mit Einzel- und Streckenlasten sowie Schubspangen zur Verstärkung des schwächer bewehrten Feldes [8] *Abb.: P. Gleich*  
 Fig. 2. Test set up with concentrated loading and continuous loading together with external shear reinforcement for span with lower shear reinforcement [8] *Source: P. Gleich*

wesentliche Ergebnisse kurz zusammenfassend dargestellt, soweit sie für die in Abschnitt 5 beschriebenen Versuche mit zusätzlicher Torsion relevant sind. Dadurch werden auch die Unterschiede bei der Bemessung von Querkraft- und Torsionsbügeln herausgestellt.

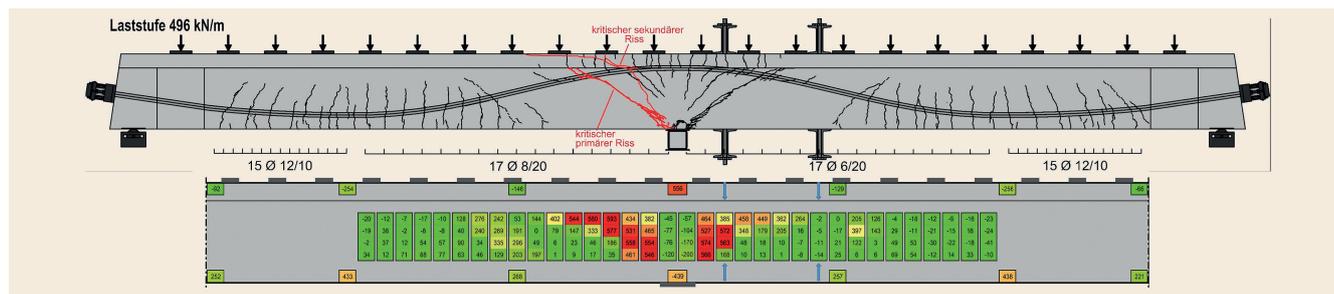
### 2.2 Wesentliche Versuchsergebnisse

#### Rissbilder

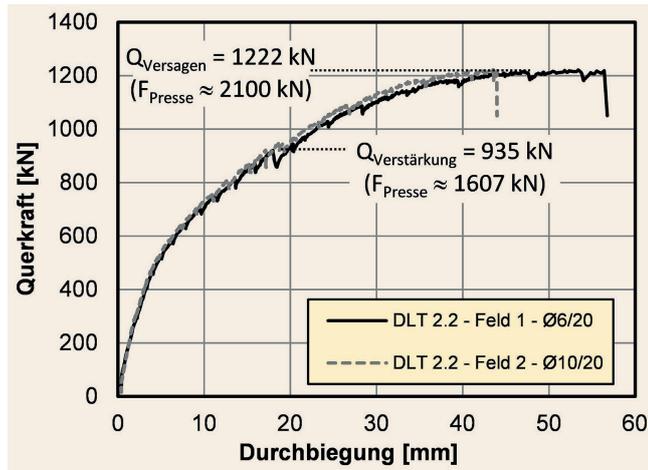
Wie aus **Bild 3** und **Bild 4** hervorgeht, hat die Art der Belastung einen großen Einfluss auf das Rissbild unter Bruchlast. Unterhalb des Rissbildes ist jeweils eine zugehörige Übersicht über



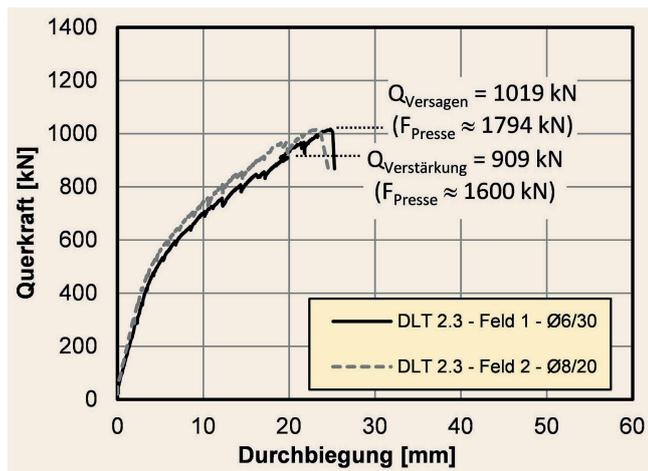
**Bild 3.** Rissbild unter Bruchlast (oben) und zugehörige Spannungen in den Bewehrungsstäben (unten) (DLT 2.3) [8], [16] *Abb.: P. Gleich*  
 Fig. 3. Crack pattern at ultimate loading (top figure) with corresponding stresses of reinforcement (bottom figure) (DLT 2.3) [8], [16] *Source: P. Gleich*



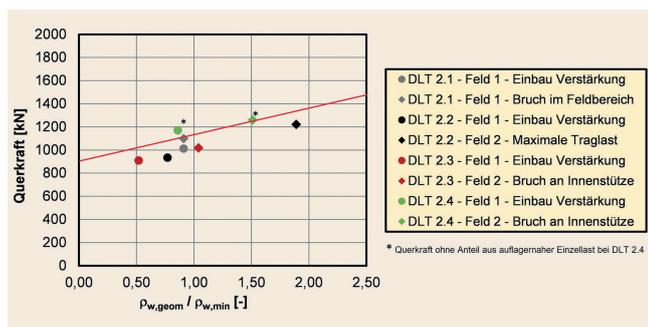
**Bild 4.** Rissbild unter Bruchlast (oben) und zugehörige Spannungen in den Bewehrungsstäben (unten) (DLT 2.4) [8], [16] *Abb.: P. Gleich*  
 Fig. 4. Crack pattern at ultimate loading (top picture) with corresponding stresses of reinforcement (bottom picture) (DLT 2.4) [8], [16] *Source: P. Gleich*



**Bild 5.** Experimentell ermittelte Querkraft-Durchbiegungskurve DLT 2.2 [16]  
 Abb.: P. Gleich  
 Fig. 5. Experimentally determined shear force-deflection-curve of DLT 2.2 [16] Source: P. Gleich



**Bild 6.** Experimentell ermittelte Querkraft-Durchbiegungskurve DLT 2.3 [16]  
 Abb.: P. Gleich  
 Fig. 6. Experimentally determined shear force-deflection-curve of DLT 2.3 [16] Source: P. Gleich



**Bild 7.** Querkrafttragfähigkeit in Abhängigkeit vom Schubbewehrungsgrad [2], [14] Abb.: P. Gleich  
 Fig. 7. Shear capacity depending on shear-reinforcement-ratio [2], [14] Source: P. Gleich

die durch DMS gemessene Dehnungen auf der Bügel- und Längsbewehrung dargestellt. Die gemessenen Dehnungen sind dabei nach dem Ampelprinzip farbig markiert, sodass ein Fließen der Bügel (rot) deutlich wird. Darüber hinaus wird die Übereinstimmung der maximal beanspruchten Bügel mit dem Rissbild sichtbar. Alle Versuchsträger zeigten im schwächer querkräftbewehrten Feld 1 (rechter Bildteil), an der Innenstütze bei hohen Lasten, ein Fließen der Bügel über einen großen Bereich. Da an diesen Stellen aufgrund fehlender Umlagerungsmöglichkeiten auf noch nicht vollständig ausgenutzte Bügel von einem unmittelbar bevorstehenden Versagen auszugehen war, wurden diese Trägerbereiche mit sich abzeichnender kritischer Rissentwicklung lokal mithilfe von vorgespannten Schubspangen verstärkt. Danach wurde das stärker bewehrte Feld bis zum Bruchzustand belastet. Die Schnittgrößen wurden dabei experimentell durch Messung der Auflagerkräfte ermittelt.

Im Hinblick auf die Art der Belastung entspricht der Träger DLT 2.4 mit Streckenlast am ehesten den realen Verhältnissen bei Spannbetonbrücken. Das Rissbild des Trägers DLT 2.4 spiegelt sehr deutlich die unterschiedlichen Beanspruchungen beispielsweise gegenüber dem Träger DLT 2.3 wider. Die Querkraft nimmt zur Feldmitte hin stark ab, die Biegebeanspruchungen dominieren in diesen Bereichen deutlich. Daher lässt sich im Feldbereich vor allem eine ausgeprägte Biegerissbildung beobachten, wohingegen insbesondere an der Innenstütze die hohe Querkraftbeanspruchung an den Schubrisen zu erkennen ist. Lediglich im Bereich der Innenstütze wurden große Bügelspannungen gemessen (Bild 4). Im Vergleich zu den Trägern unter Einzellasten fällt auf, dass die Biegeschubrisse an der Innenstütze des Versuchsträgers mit Streckenlast steiler verlaufen. Dieser Effekt ist jedoch hier darauf zurückzuführen, dass der Nulldurchgang des Biegemomentes unter Streckenlasten näher an der Innenstütze liegt, wodurch die mögliche Biegeschubrisse an der Innenstütze ausgehend vom oberen Rand auf einen deutlich kürzeren Bereich begrenzt wird.

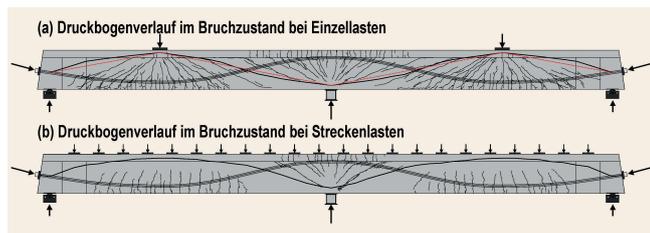
**Querkraft-Durchbiegungskurven**

Wie der Vergleich der Querkraft-Durchbiegungskurven in **Bild 5** und **Bild 6** zwischen den Versuchen (**Tabelle 1**) DLT 2.2 und DLT 2.3 zeigt, reicht zwar die Mindestquerkräftbewehrung aus, um einen spröden Schubbruch zu vermeiden, jedoch bedarf es einer größeren Bügelbewehrung, um die volle Biegetragfähigkeit bis zur Ausbildung von Fließgelenken ausnutzen zu können. So wird nur im zweiten Teilversuch des DLT 2.2 mit der größeren Querkraftbewehrung das sich dabei ausbildende Fließplateau in der Querkraft-Durchbiegungskurve beim Biegeversagen entsprechend einem Fließgelenkmechanismus erreicht (Bild 5). Dagegen wurde beim Versuchsträger DLT 2.3 das Fließplateau aufgrund des vorzeitigen Querkraftversagens nicht erreicht (Bild 6).

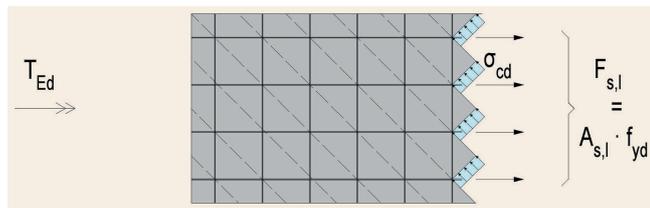
**Einfluss des Schubbewehrungsgrads auf die Querkrafttragfähigkeit**

Die Auswertung der Versuchstraglasten ergibt einen mäßig linearen Anstieg der Querkrafttragfähigkeit mit zunehmendem Schubbewehrungsgrad bis schließlich Biegeversagen maßgebend wird (**Bild 7**). Es zeigt sich ein erheblicher Betontraganteil, wenn der Schubbewehrungsgrad gegen null geht. Dieser Betontraganteil kann beispielsweise mit dem Druckbogenmodell beziehungsweise

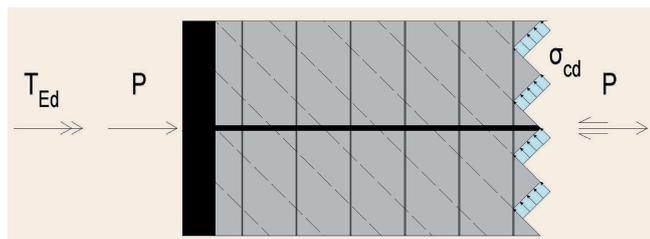




**Bild 10.** Verlauf des Druckbogens bei Einzel- und Streckenlasten [8]  
 Abb.: P. Gleich  
 Fig. 10. Development of the arch for single- and distributed loading [8]  
 Source: P. Gleich



**Bild 11.** Reine Torsion – Stahlbeton Abb.: E. Stakalies  
 Fig. 11. Pure torsion – reinforced concrete Source: E. Stakalies



**Bild 12.** Reine Torsion – Spannbeton. Idealisierte Krafteinleitung von P durch starre Platte Abb.: E. Stakalies  
 Fig. 12. Pure torsion – prestressed concrete. Idealized introduction of force P by a rigid plate Source: E. Stakalies

kraft mehr oder weniger vom Verlauf des Druckbogens ab, welcher vereinfacht nach dem Druckbogenmodell (DBM) ohne Berücksichtigung einer Schubrisssbildung ermittelt wurde [3].

**Bild 9** stellt das idealisierte Fachwerkmodell eines Spannbetonbalkens infolge Querkraftbiegung beispielhaft im B-Bereich mit positivem einwirkendem Biegemoment dar. Aus der Fachwerkwirkung resultiert im Steg eine um den Winkel  $\theta_B$  geneigte Druckstrebenkraft  $F_{cw}$ , welche mit ihrer horizontalen Komponente  $F_{cwh}$  bei der Bestimmung des Druckbogenverlaufs zusätzlich berücksichtigt wird. Dabei wird der Angriffspunkt der Biegedruckkraft  $F_c$  zunächst über die Dehnungsebene infolge Biegung und Vorspannkraft bestimmt. Die Kraft  $F_{cwh}$  greift im Abstand  $z_{\text{gewichtet}}/2$  davon an. Durch ein derartiges Vorgehen werden die um den Winkel  $\theta_B$  geneigten Druckstreben im Steg aus der Querkraftbeanspruchung bei der Druckbogenermittlung, mit ihrer Normalkraftkomponente, mitberücksichtigt. Letztlich wird bei Anwendung des EDBM die Momenten-Querkraft-Interaktion konsequent angewendet, wie sie bereits der Versatzmaßregel zugrunde liegt.

Beim Durchlaufträger ist der Verlauf des Druckbogens unmittelbar abhängig von der Art der Belastung. Wie in **Bild 10** dargestellt entspricht er der Stützlinie (rote Linie). Die schwarze Linie entspricht der rechnerisch mittels FEM ermittelten Stützlinie. Mit

dem DBM kann der Betontraganteil und damit die Querkrafttragfähigkeit der Versuchsträger zutreffend quantifiziert werden, was durch bisherige Versuchsnachrechnungen bestätigt werden konnte [16]. Das EDBM ist detailliert auch für die Anwendung in D-Bereichen (Fächer über Auflagern) in [14] beschrieben. Für weitere Details wird auf [14] und [16] verwiesen.

### 3.3 Betontraganteil nach Hegger/Herbrand

Einen anderen Lösungsansatz zur Bestimmung des Betontraganteils verfolgen Hegger/Herbrand, basierend auf der Querkrafttragfähigkeit eines Bauteils ohne Querkraftbewehrung [10], [17]. Bei diesem Verfahren, das in der zweiten Ergänzung der Nachrechnungsrichtlinie seinen Niederschlag finden wird, kann der Nachweis der Querkrafttragfähigkeit auf Querschnittsebene erfolgen. Dagegen stellt das Druckbogenmodell einen Nachweis auf Systemebene dar.

Das nachfolgend beschriebene Modell zur Ermittlung der Torsionslängsbewehrung ist neben dem DBM und EDBM auch mit dem Nachweismodell von Hegger/Herbrand kombinierbar, das in [10], [18] detailliert beschrieben ist.

### 3.4 Weitere Ansätze

In jüngster Vergangenheit wurden außer den bereits genannten Arbeiten auch von weiteren Autoren Ansätze entwickelt, um die Querkrafttragfähigkeit speziell von bestehenden Spannbetonbrücken mit geringer Querkraftbewehrung möglichst realitätsnah ermitteln zu können. Stellvertretend seien an dieser Stelle die Untersuchungen an der TU Wien genannt [9], [15].

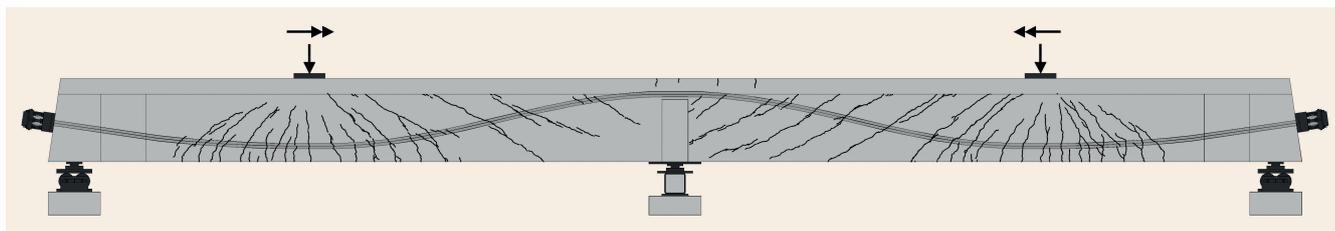
## 4 Torsionstragverhalten bei kombinierter Beanspruchung aus M+V+T

### 4.1 Torsionstragverhalten bei reiner Torsion (T)

Die Bemessungsformeln in EC2 gelten für reine Torsionsbeanspruchung bei einem Stahlbetonstab. Während beispielsweise bei den Stegen die vertikalen Kraftkomponenten der unter dem Winkel  $\theta$  geneigten Betondruckstrebenkräfte durch die Bügel aufgenommen werden, müssen deren horizontalen Kraftkomponenten an der Stirnfläche durch die Torsionslängsbewehrung ins Gleichgewicht gesetzt und zurückverankert werden (**Bild 11**).

Im Falle einer zusätzlichen äußeren Druckkraft P auf die Stirnflächen, zum Beispiel aufgebracht über eine starre Platte durch eine Vorspannkraft, reduziert sich die erforderliche Torsionslängsbewehrung, beziehungsweise bei ausreichend großer Kraft P ist sie nicht mehr erforderlich (**Bild 12**). Die horizontalen Kraftkomponenten der geneigten Druckstrebenkräfte werden durch die Vorspannkraft P ins Gleichgewicht gesetzt.

Bei einem Spannbetonbalken sind die Trägerenden mit den Spanngliedverankerungen in der Regel ungerissen, sodass sich vergleichbare Verhältnisse ergeben, die eine Reduzierung der Torsionslängsbewehrung gemäß EC2-2 [19] erwarten lassen (**Bild 13**). Basierend auf diesen Modellvorstellungen wurde die in Abschnitt 4.3 beschriebene Vorgehensweise bei der Ermittlung der Torsionslängsbewehrung für die Auslegung der Versuchsträger mit kombinierter Beanspruchung (M+V+T) zugrunde gelegt. Dabei wird die Belastung zur Erzeugung einer zusätzlichen Torsion gegenüber den Referenzversuchen exzentrisch zur Balkenachse aufgebracht.



**Bild 13.** Kombinierte Beanspruchung – M+V+T Abb.: E. Stakalies  
 Fig. 13. Combined loading – M+V+T Source: E. Stakalies

### 4.2 Ermittlung der zusätzlichen Bügelbewehrung infolge Torsion (M+V+T)

Grundlage für die Bemessung der Versuchsträger DLT 2.5 und DLT 2.6 mit kombinierter Beanspruchung aus Biegung, Querkraft und Torsion (M+V+T) bilden die in Abschnitt 2 beschriebenen Referenzversuchsträger DLT 2.2 (Feld 1) und DLT 2.3 (Feld 2) mit reiner Querkraftbiegung (M+V). Ausgehend von den Referenzversuchen mit bekannter Versuchstraglast  $F_u$  sowie den zugehörigen Schnittgrößen  $M_u$  und  $V_u$  wird zunächst die aus Torsion infolge der Lastexzentrizität  $e$  zusätzlich erforderliche Torsionsbügelbewehrung mit dem räumlichen Fachwerkmodell nach EC2-2 ermittelt und in voller Größe zusätzlich eingebaut. Die Neigung der Druckstreben im Steg wird basierend auf den Schubbrisswinkeln der Referenzträger mit  $\cot \theta = 2,5$  gewählt.

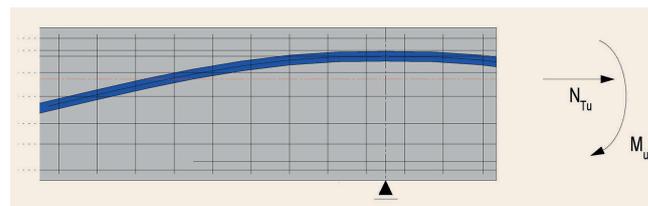
Die gesamte erforderliche Bügelbewehrung resultiert aus der Querkraftbewehrung unter Berücksichtigung des Betontraganteils nach dem Druckbogenmodell (entsprechend den Referenzträgern), superponiert mit dem ermittelten zusätzlichen Anteil aus der nach EC2-2 erforderlichen Torsionsbügelbewehrung. Während bei der Querkraftbeanspruchung eine deutlich reduzierte Bügelbewehrung aus dem Druckbogenmodell resultiert, wurde die erforderliche Torsionsbügelbewehrung nach Norm vollständig eingebaut, da bei Torsion keine Druckbogenwirkung als zusätzlicher Betontraganteil analog zur Querkraft / Momentenbeanspruchung erwartet wird.

### 4.3 Ermittlung der zusätzlichen Längsbewehrung infolge Torsion (M+V+T)

Hinsichtlich der Längsbewehrung wurden die Versuchsträger so konzipiert, dass eine Bemessung der zusätzlich erforderlichen Torsionslängsbewehrung unter Berücksichtigung der kombinierten Beanspruchung aus Biegung, Querkraft und Torsion erfolgte. Es wurde dabei die resultierende Längszugkraft ( $N_{Tu}$ ) aus der statisch erforderlichen Torsionslängsbewehrung ermittelt. Diese wurde dann als Zugkraft zentrisch im Schwerpunkt des Querschnitts angesetzt und bei der Biegebemessung berücksichtigt (**Bild 14**). Diese Idealisierung erfolgt bei einer Beanspruchung überwiegend durch Biegung.

Bei der Ermittlung der zusätzlichen Längsbewehrung infolge Torsion wird zunächst von dem, durch die Torsionslängsbewehrung aufnehmbaren Torsionsmoment  $T_u$  nach EC2-2 [19] ausgegangen, wobei für Versuchsnachrechnungen die Mittelwerte der Festigkeiten eingesetzt werden:

$$T_u = \frac{A_{sl}}{u_k} \cdot f_{ym} \cdot 2 \cdot A_k \cdot \tan \theta \quad \text{mit } T_u = F_u \cdot e \quad (1)$$



**Bild 14.** Längsbewehrung infolge  $M_u + N_{Tu} : A_{s(M,T)}$  Abb.: E. Stakalies  
 Fig. 14. Longitudinal reinforcement due to  $M_u + N_{Tu} : A_{s(M,T)}$  Source: E. Stakalies

Daraus geht durch Umstellung der Gleichung (1) die zugehörige Längskraft aus Torsion  $N_{Tu}$  hervor, die im Schwerpunkt des Querschnitts bei der Biegebemessung mit angesetzt wird:

$$N_{Tu} = A_{sl} \cdot f_{ym} = \frac{T_u}{2 \cdot A_k} \cdot u_k \cdot \cot \theta \quad (2)$$

Bei dieser Vorgehensweise und überwiegender Biegebeanspruchung wird der positive Effekt aus der Überdrückung der Torsionslängszugkräfte im Bereich der Biegedruckzone infolge Biegung sowie der Tragwirkung der Spannglieder entsprechend ihrer Lage im Querschnitt bei der Bemessung automatisch mitberücksichtigt. Auf diese Weise kann die Längsbewehrung gegenüber einer Bemessung bei reiner Torsion deutlich reduziert werden.

## 5 Versuche mit kombinierter Beanspruchung aus Biegung, Querkraft und Torsion

### 5.1 Versuchsprogramm

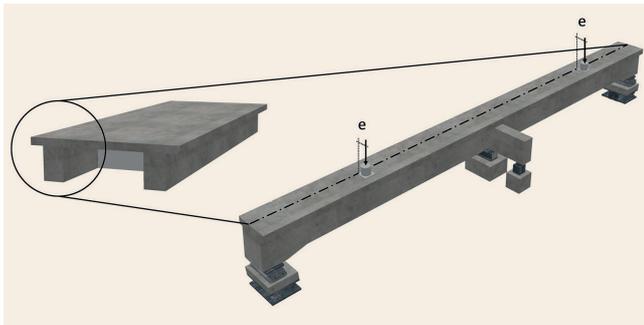
An zwei vorgespannten Durchlaufträgern (DLT 2.5 und DLT 2.6) wurden Versuche mit kombinierter Beanspruchung aus Biegung, Querkraft und Torsion durchgeführt. An jedem der beiden Spannbetonbalken wurden zwei Teilversuche durchgeführt, je einer im schwächer und einer im stärker bewehrten Feld (**Tabelle 1**).

Die Versuche mit kombinierter Beanspruchung stellten eine Erweiterung der Versuche mit reiner Querkraftbiegung dar. Die Versuchsträger waren hinsichtlich Geometrie, Bewehrung und Spanngliedern lediglich bis auf die größere Stegbreite von 35 cm gegenüber 30 cm in Übereinstimmung mit den reinen Querkraftversuchen, die als Referenzversuche dienten. Letztere sind daher in Tabelle 1 mit aufgeführt.

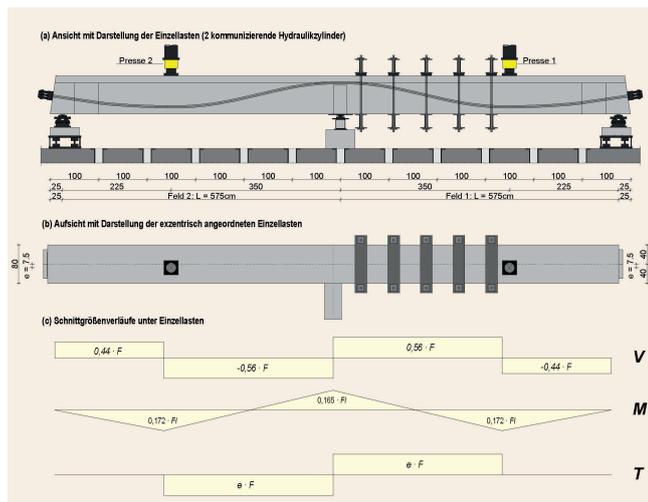
Die Versuchslasten wurden durch zwei kraftgesteuerte, hydraulische Pressen mit einer Kapazität von 2,0 MN aufgebracht. Die Einzellasten wurden jeweils im Abstand von 3,50 m von der Innenstütze mit einer Exzentrizität von 7,5 cm zur Längsachse des Trägers aufgebracht (**Bild 15**). Dadurch entsteht im Bereich zwischen Lasteinleitung und Innenstütze zusätzlich eine konstante Torsionsbeanspruchung mit wechselndem Vorzeichen in den beiden Feldern, vergleichbar mit der Beanspruchung an den In-

**Tabelle 1.** Versuchsprogramm zur kombinierten Beanspruchung M + V + T  
 Table 1. Test-program for combined loading M + V + T

Versuch	Querschnitt	Längsbewehrung	Querkraftbewehrung		Belastung	Beton	Vorsp.
			$\rho_{w,geo} / \rho_{w,min} [\%]$			$f_{ck,zyl}$	$\sigma_{cp}$
			Feld 1	Feld 2		[MPa]	[MPa]
Referenzversuche DLT 2.2, DLT 2.3	T	$A_{s,o} = 16 \text{ } \varnothing 12$ $A_{s,u,Feld} = 3 \text{ } \varnothing 16 + 2 \text{ } \varnothing 20$ $A_{s,u,Stütz} = A_{s,u,Feld} + 2 \text{ } \varnothing 20$	0,77 ( $\varnothing 6/20$ ) ( $\hat{=} a_{sw,v}$ ) DLT 2.2	1,04 ( $\varnothing 8/20$ ) ( $\hat{=} a_{sw,v}$ ) DLT 2.3	M + V Einzellast	39,5 40,7	3,9
DLT 2.5	T	$A_{s,o} = 14 \text{ } \varnothing 12 + 2 \text{ } \varnothing 20$ $A_{s,u,Feld} = 3 \text{ } \varnothing 16 + 2 \text{ } \varnothing 20$ $A_{s,u,Stütz} = A_{s,u,Feld} + 2 \text{ } \varnothing 20$ $A_{s,Steg} = 4 \text{ } \varnothing 12$ je Seite	1,03 ( $\varnothing 8/20$ ) ( $\hat{=} a_{sw,V+T}$ )	1,66 ( $\varnothing 10/20$ ) ( $\hat{=} a_{sw,V+T}$ )	M + V + T Einzellast exzentrisch	39,7	3,3
DLT 2.6	T	$A_{s,o} = 16 \text{ } \varnothing 12$ $A_{s,u,Feld} = 3 \text{ } \varnothing 16 + 2 \text{ } \varnothing 20$ $A_{s,u,Stütz} = A_{s,u,Feld} + 2 \text{ } \varnothing 20$	1,03 ( $\varnothing 8/20$ ) ( $\hat{=} a_{sw,V+T}$ )	1,66 ( $\varnothing 10/20$ ) ( $\hat{=} a_{sw,V+T}$ )	M + V + T Einzellast exzentrisch	41,9	3,3



**Bild 15.** Konzept für Großversuche mit M+V+T Abb.: E. Stakalies  
 Fig. 15. Concept for large-scale tests with M+V+T Source: E. Stakalies



**Bild 16.** Versuchsaufbau mit exzentrischer Belastung für M+V+T [16]  
 Abb.: E. Stakalies  
 Fig. 16. Test set-up with eccentric loading for M+V+T [16] Abb.: E. Stakalies

nenstützen von Plattenbalkenbrücken mit Querträgern. Der so belastete Balken wurde über einen nachträglich anbetonierten Querträger ins Gleichgewicht gesetzt. Die Versuchsanordnung ist in **Bild 16** dargestellt.

Bei Betonbrücken kommt im Allgemeinen keine reine Torsion ohne gleichzeitige Biegung und Querkraft vor. Die für reine Torsion hergeleiteten Bemessungsmodelle werden auch bei kombinierten Beanspruchungen als Näherung angewendet. Bei einer kombinierten Beanspruchung ist aber das Tragverhalten im Zustand II sehr stark abhängig vom Größenverhältnis dieser Schnittgrößen untereinander. Bei den Versuchen dominiert hier bei Plattenbalkenbrücken die Biegebeanspruchung. Das bei den Versuchen aufgebrauchte Verhältnis M/T wurde anhand ausgeführter Plattenbalkenbrücken abgeschätzt.

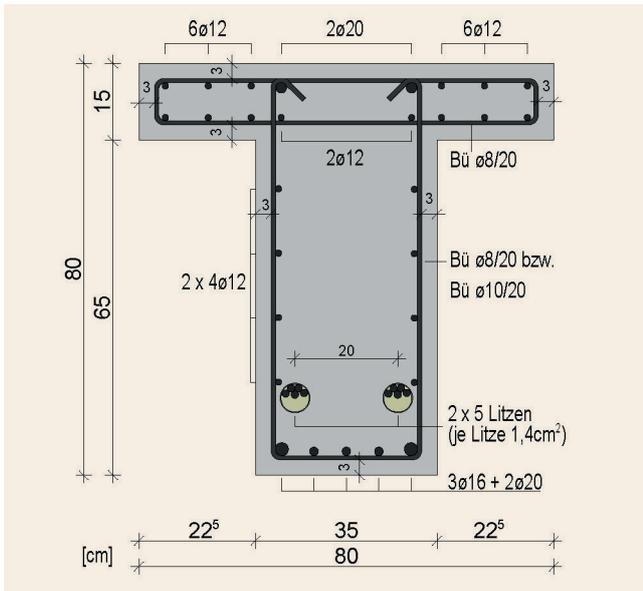
Die Versuchsträger wurden, wie bereits in Abschnitt 2.1 beschrieben, bis kurz vor dem Versagen der Querkraftbewehrung im schwächer bewehrten Feld belastet. Anschließend wurden nach vollständiger Entlastung äußere vorgespannte Schubspangen als Verstärkung eingebaut. Danach wurde der Träger bis zum Bruch im stärker bewehrten Feld erneut belastet. Somit konnten auch hier mit einem Versuchsbalken die Traglasten für zwei Bewehrungsgrade experimentell bestimmt werden.

**Bewehrung für DLT 2.5**

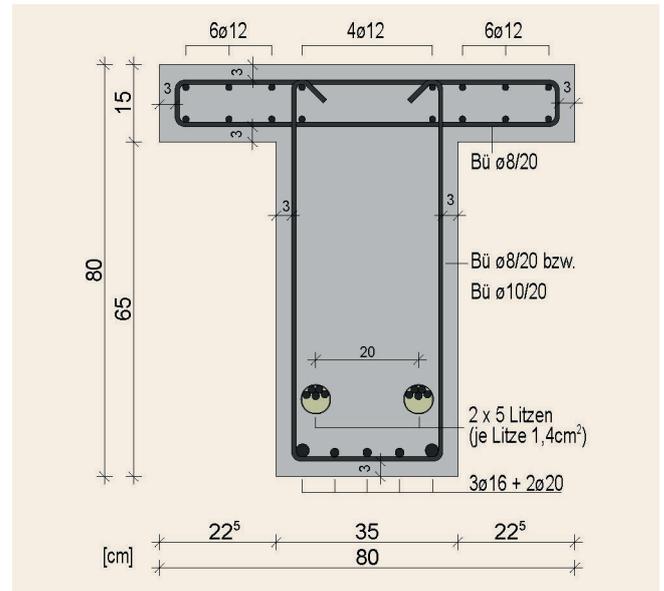
Die Torsionsbügel für den Versuchsträger DLT 2.5 wurden mit dem klassischen Bemessungsmodell für Torsion in EC2 [6] bemessen und in voller Größe zu den Querkraftbügeln der Referenzversuchsträger addiert. Dabei wurde  $\cot \theta = 2,5$  entsprechend der beobachteten Schubrissneigung der Referenzträger angesetzt. Alle Bügel wurden oben mit Haken verankert und durch die Querbewehrung der Gurtplatte geschlossen (**Bild 17**). Dies wurde sowohl in den Druck- als auch Zugzonenbereichen längs der Durchlaufträger im oberen Querschnittsbereich auf diese Weise ausgeführt. Die Bügel wurden mithin nicht nach den Regeln für Torsionsbügel in EC2 [6] geschlossen.

Zur Bestimmung der erforderlichen Bewehrung infolge einer kombinierten Beanspruchung aus Biegung, Querkraft und Torsion wurde das in Abschnitt 4.2 und 4.3 vorgestellte Modell angewandt.

Durch diese Vorgehensweise konnte die rechnerisch erforderliche Längsbewehrung gegenüber einer Bemessung bei reiner Torsion deutlich reduziert werden.



**Bild 17.** Feldquerschnitt – DLT 2.5 (mit zusätzlicher Torsionslängsbewehrung) [16] Abb.: E. Stakalies  
 Fig. 17. Field cross section – DLT 2.5 (with additional longitudinal reinforcement due to torsion) [16] Source: E. Stakalies



**Bild 18.** Feldquerschnitt – DLT 2.6 (ohne zusätzliche Torsionslängsbewehrung) [16] Abb.: E. Stakalies  
 Fig. 18. Field cross section – DLT 2.6 (without additional longitudinal reinforcement due to torsion) [16] Source: E. Stakalies

**Bewehrung für DLT 2.6**

Die Bewehrung für DLT 2.6 war identisch mit Versuchsträger 2.5, allerdings wurde gegenüber dem Referenzträger unter reiner Querkraftbiegung (M+V) keine zusätzliche Torsionslängsbewehrung eingebaut (Bild 18).

**5.2 Versuchsergebnisse**

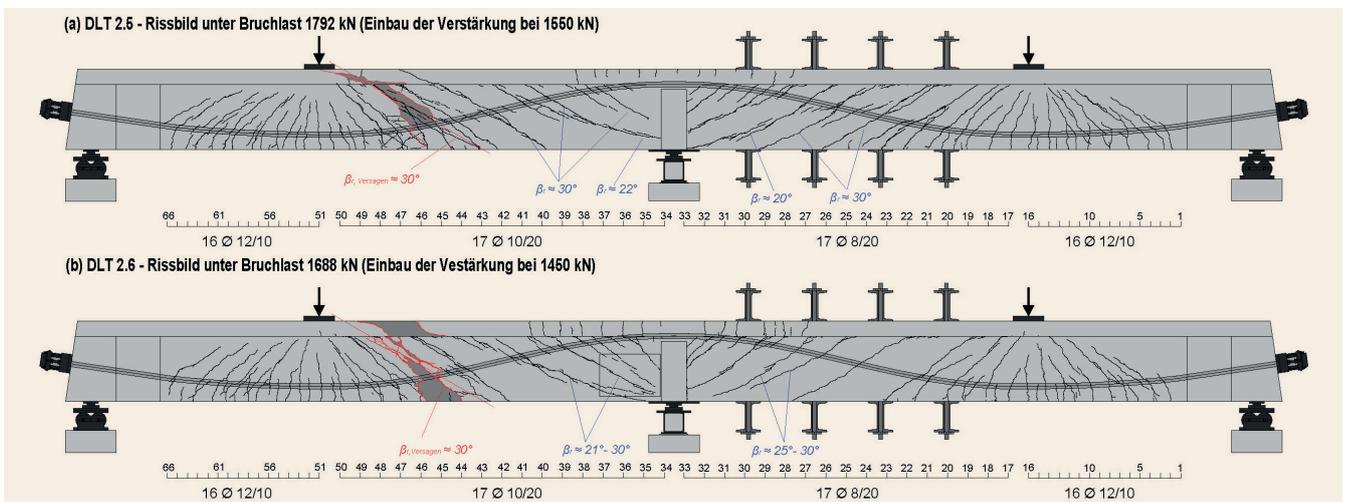
**Rissbilder**

In Bild 19 sind die Rissbilder der beiden Versuchsträger im Bruchzustand dargestellt. Im Bruchzustand sind die Versuchsträger über die gesamte Länge gerissen, wobei die kritischen Risse, die im stärker bewehrten Feld zum endgültigen Bruch geführt ha-

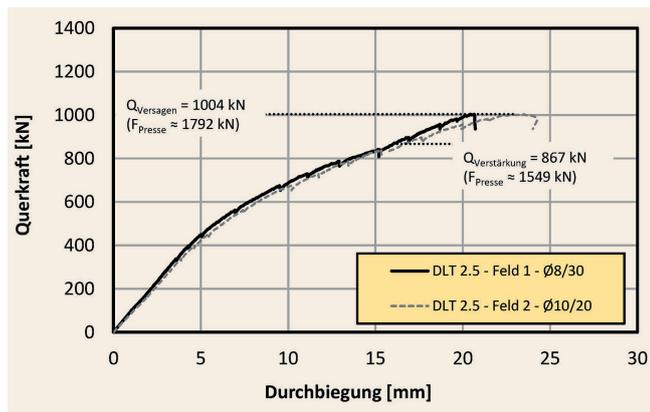
ben, rot eingezeichnet sind. Während der Versuchsträger DLT 2.5 durch eine Überbeanspruchung der Bügelbewehrung versagte, zeigte sich bei dem Versuchsträger DLT 2.6 ohne zusätzliche Torsionslängsbewehrung eine deutliche Zunahme der Rissbildung bis in den Bereich der Druckzone an der Innenstütze hinein. Dies lässt ein bevorstehendes gleichzeitiges Versagen der Druckzone an der Innenstütze vermuten. Inwieweit durch eine kombinierte Beanspruchung M+V+T auch die Druckzone, beispielsweise von schlanken Plattenbalkenquerschnitten, kritisch werden kann, ist noch durch weitere Versuche abzuklären.

**Last-Durchbiegungskurven**

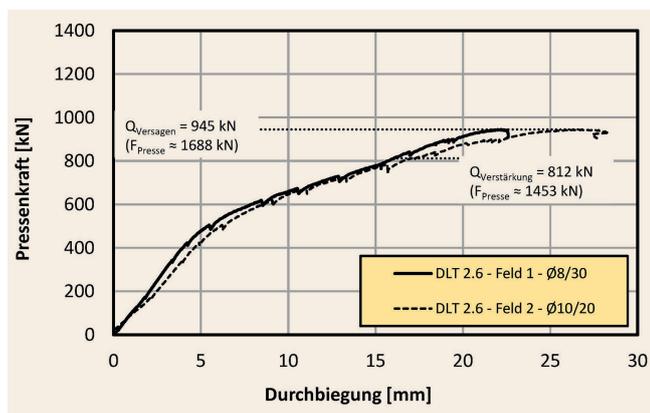
In Bild 20 und Bild 21 sind die Last-Durchbiegungskurven der Träger DLT 2.5 und DLT 2.6 jeweils für den ersten Teilver-



**Bild 19.** Rissbilder im Bruchzustand, Versagensrisse rot (DLT 2.5 und DLT 2.6) [16] Abb.: E. Stakalies  
 Fig. 19. Crack pattern at ultimate limit state, critical crack marked in red (DLT 2.5 and DLT 2.6) [16] Source: E. Stakalies



**Bild 20.** Experimentell ermittelte Querkraft-Durchbiegungskurve DLT 2.5 [16] Abb.: E. Stakalies  
 Fig. 20. Experimentally determined shear force deflection-curve of DLT 2.5 [16] Source: E. Stakalies



**Bild 21.** Experimentell ermittelte Querkraft-Durchbiegungskurve DLT 2.6 [16] Abb.: E. Stakalies  
 Fig. 21. Experimentally determined shear force deflection-curve of DLT 2.6 [16] Source: E. Stakalies

**Tabelle 2.** Experimentell ermittelte Versuchstraglasten  
 Table 2. Experimentally determined test capacities

Versuchsträger	Versuchstraglast (M + V + T)	Referenzversuch (M + V)	Abweichung
mit zusätzlicher Torsionslängsbewehrung			
DLT2.5 – Feld 1	1 549 kN	1 607 kN	- 3,6 %
DLT2.5 – Feld 2	1 792 kN	1 798 kN	- 0,3 %
ohne zusätzliche Torsionslängsbewehrung			
DLT2.6 – Feld 1	1 453 kN	1 607 kN	- 9,2 %
DLT2.6 – Feld 2	1 688 kN	1 798 kN	- 6,1 %

such, bis zur Verstärkung des schwächer bewehrten Feldes und den zweiten Teilversuch, bis zum Bruch des stärker bewehrten Feldes, dargestellt. Versagen der Versuchsträger DLT 2.5 und DLT 2.6 trat jeweils im stärker bewehrten Feld zwischen Lasteinleitung und Innenstütze ein.

Der Bemessungsvorschlag für die Bewehrung konnte zumindest bei den hier durchgeführten Versuchen durch das Erreichen von 97 % der Traglast der Referenzversuche ohne zusätzliche Torsion bestätigt werden. Der Versuchsträger DLT 2.6, ohne jegliche zusätzliche Torsionslängsbewehrung, konnte dagegen nur circa 90 % der Traglast der Referenzversuche erreichen (**Tabelle 2**).

Die beiden Versuchsträger unterschieden sich lediglich anhand der eingebauten Torsionslängsbewehrung über die Steghöhe. Der Versuchsträger DLT 2.6 wurde dabei gänzlich ohne zusätzliche Torsionslängsbewehrung ausgeführt, wobei die Tragfähigkeit um 10 % unterschritten wurde im Vergleich zu dem Versuch DLT 2.5 mit zusätzlicher Torsionslängsbewehrung. Von einer Mitwirkung der Spannglieder kann dementsprechend ausgegangen werden. Das endgültige Versagen trat bei beiden Trägern in Feld 2 nahe der Lasteinleitungsstelle letztlich durch den Bruch der stark eingeschnürten Betondruckzone auf. Primäre Ursache für das Versagen war das Fließen der Bewehrung in Verbindung mit großen Stahldehnungen.

## 6 Fazit und Ausblick

Drei großformatige Versuchsträger wurden durch Einzellasten unter reiner Querkraftbiegung (M+V) getestet. Die Ergebnisse wurden bereits in früheren Veröffentlichungen vorgestellt [7], [8]. Darüber hinaus wurde für eine realitätsnahe Ermittlung der Querkrafttragfähigkeit ein analytisches Druckbogenmodell entwickelt und beschrieben [2], [3].

Im vorliegenden Beitrag wurden erste Ergebnisse von zwei großformatigen Versuchsträgern mit kombinierter Beanspruchung aus Biegung, Querkraft und zusätzlicher Torsion (M+V+T) vorgestellt. Dabei wurde ein Ansatz für die Bestimmung einer reduzierten Torsionslängsbewehrung unter Anrechnung der Spannglieder dargestellt, der anhand der Ergebnisse erster experimenteller Untersuchungen bestätigt werden konnte. Außerdem wurde gezeigt, dass die ermittelte Bügelbewehrung aus dem analytischen Druckbogenmodell [3], mit der vollen Torsionsbügelbewehrung nach EC2 überlagert werden muss. Durch den beschriebenen, genaueren Bemessungsvorschlag, welcher bei überwiegender Biegung die Berücksichtigung der Interaktion von M, V und T erlaubt, ist es somit möglich, Tragreserven zu aktivieren.

Der umfassende Einsatz von Messtechnik und die detaillierte Dokumentation dieser großformatigen Versuchsträger bilden die Basis für noch folgende weitergehende Untersuchungen hinsichtlich des Tragverhaltens von vorgespannten Durchlaufträgern bei kombinierter Beanspruchung. Dabei wird ein besonderes Augenmerk auch auf ergänzende Simulationsberechnungen mittels der nichtlinearen FEM zum besseren Verständnis des Tragverhaltens sowie zur Durchführung von Parameterstudien gelegt.

Als Gesamtziel soll das Nachweisverfahren für eine kombinierte Beanspruchung aus Biegung, Querkraft und Torsion weiterentwickelt und anhand der bereits durchgeführten und noch folgenden Großversuche sowie mittels nichtlineare FEM abgesichert werden, um künftig realitätsnähere Ansätze für die Bewertung von bestehenden Brücken durch eine Nachrechnung unter der kombinierten Beanspruchung aus Biegung, Querkraft und Torsion bereitstellen zu können.

## Literatur

- [1] Maurer, R.; Kiziltan, H.: Zum Einfluss des Druckbogens auf den Querkraftwiderstand von Spannbetonbalken. In: Bauingenieur 88 (2013), Heft 4, S. 165-176.
- [2] Gleich, P.; Kattenstedt, S.; Maurer, R.: Erweitertes Druckbogenmodell für die Bestimmung der Querkrafttragfähigkeit von Stahl- und Spannbetonbalken. In: Beton- und Stahlbetonbau 111 (2016), Heft 5, S. 268-277.
- [3] Gleich, P.: Das Druckbogenmodell – Ansatz eines zus. Betontraganteils beim Querkraftnachweis im Zuge der Nachrechnung bestehender Brücken. In: Beton- und Stahlbetonbau 112 (2017), Heft 7, S. 450.
- [4] Naumann, J.: Brücken und Schwerverkehr – Eine Bestandsaufnahme. In: Bauingenieur 85 (2010), Heft 1, S. 1-9.
- [5] Hegger, J.; Maurer, R.; Zilch, K. et al.: Beurteilung der Querkraft und Torsionstragfähigkeit von Brücken im Bestand – Kurzfristige Lösungsansätze. Schlussbericht zu BAST FE 15.0482/2009/FRB, 2014.
- [6] DIN EN 1992-1-1, Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau mit zugehörigem nationalen Anhang DIN EN 1992-1-1:2011, Ausgabe Januar 2011.
- [7] Maurer, R.; Gleich, P.; Zilch, K. et al.: Querkraftversuche an einem Durchlaufträger aus Spannbeton. In: Beton- und Stahlbetonbau, Heft 10 (2014), S. 654-665.
- [8] Gleich, P.; Maurer, R.: Querkraftversuche an Spannbetondurchlaufträgern mit Plattenbalkenquerschnitt. In: Bauingenieur 93 (2018), Heft 2, S. 51-61.
- [9] Huber, P.; Kromoser, B.; Huber, T. et al.: Experimentelle Untersuchung zum Querkrafttragverhalten von Spannbetonträgern mit geringer Schubbewehrung. In: Bauingenieur 91 (2016), Heft 6, S. 238-247.
- [10] Herbrand, M.; Kueres, D.; Classen, M. et al.: Einheitliches Querkraftmodell zur Bemessung von Stahl- und Spannbetonbrücken im Bestand. In: Beton- und Stahlbetonbau 111 (2016), Heft 2, S. 58-67.
- [11] Herbrand, M.; Classen, M.; Adam, V.: Querkraftversuche an Spannbetondurchlaufträgern mit Rechteck und I-Querschnitt. In: Bauingenieur (2017), Heft 11, S. 465-473.
- [12] Schramm, N.; Fischer, O.; Scheufler, W.: Experimentelle Untersuchungen an vorgespannten Durchlaufträger-Teilsystemen zum Einfluss nicht mehr zugelassener Bügelformen auf die Querkrafttragfähigkeit. In: Bauingenieur (2019), Heft 1, S. 9-20.
- [13] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung: Richtlinie zur Nachrechnung von Straßenbrücken im Bestand (Nachrechnungsrichtlinie), Bonn, Ausgabe Mai 2011.
- [14] Gleich, P.: Das erweiterte Druckbogenmodell zur Beschreibung des Betontraganteils bei Querkraft. Technische Universität Dortmund, Dissertation, 2019.
- [15] Huber, P.; Kromoser, B.; Huber, T. et al.: Berechnungsansatz zur Ermittlung der Schubtragfähigkeit bestehender Spannbetonbrückenträger mit geringem Querkraftbewehrungsgrad. In: Bauingenieur 91 (2016), Heft 6, S. 227-237.
- [16] Hegger, J.; Maurer, R.; Fischer, O. et al.: Beurteilung der Querkraft- und Torsionstragfähigkeit von Brücken im Bestand – erweiterte Bemessungsansätze, Schlussbericht zu BAST FE 15.0591/2012/FRB, 2018.
- [17] Herbrand, M.; Hegger, J.: Experimentelle Untersuchungen zum Einfluss einer externen Vorspannung auf die Querkrafttragfähigkeit vorgespannter Durchlaufträger. In: Bauingenieur 88 (2013), Heft 12, S. 509-517.
- [18] Herbrand, M.: Strength Models for Reinforced and Prestressed Concrete Members. Aachen, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule, Dissertation, 2017.
- [19] DIN EN 1992-2: Eurocode 2-2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 2: Betonbrücken – Bemessungs- und Konstruktionsregeln mit zugehörigem nationalen Anhang DIN EN 1992-2:2013; Deutsche Fassung, Ausgabe April 2013.



Univ.-Prof. Dr.-Ing.  
Reinhard Maurer

reinhard.maurer@tu-dortmund.de

Abb.: Detlef Podehl



Eva Stakalies, M.Sc.

eva.stakalies@tu-dortmund.de

Technische Universität Dortmund  
August-Schmidt-Straße 8, 44229 Dortmund

Abb.: Steven Burns