

# Längsverzerrung und Querkraft bei vorge- spannten Querschnitten – Horizontale Kräfte für vertikales Gleichgewicht

<https://doi.org/10.14459/2023.1724792.mbs27.04>

*Sebastian Lamatsch, Sebastian Thoma, Oliver Fischer*



**Sebastian Lamatsch, M.Sc.**

2017 B.Sc. Bauingenieurwesen; TUM  
2020 M.Sc. Bauingenieurwesen; TUM  
seit 08.2020 Wissenschaftlicher Mitarbeiter,  
Lehrstuhl für Massivbau, TUM



**Sebastian Thoma, M.Sc.**

2015 B.Eng. Bauingenieurwesen; HM  
2017 M.Sc. Bauingenieurwesen; TUM  
seit 11.2017 Wissenschaftlicher Mitarbeiter,  
Lehrstuhl für Massivbau, TUM



**Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirt. Ing. Oliver Fischer**

Studium Bauingenieurwesen, TUM, Diplom 1988  
1989-1995 Wissenschaftlicher Assistent, Universität  
der Bundeswehr München, Promotion 1994  
1996-2009 Verschiedene Fach- und Führungspositio-  
nen in der Bauindustrie im In- und Ausland  
2007 Diplomwirtschaftsingenieur, Univ. Hagen  
seit 10.2009 Ordinarius für Massivbau, TUM  
seit 2011 Prüflingenieur und EBA-Prüfer

**Vor dem Hintergrund spezieller Fragestellungen des Spannbetonbrückenbaus sind in jüngster Vergangenheit theoretische und experimentelle Bemühungen intensiviert worden, wobei insbesondere charakteristische Tragmechanismen vorgespannter Durchlaufträger zur Diskussion standen und einzelne Parameter isoliert betrachtet wurden. Ein Umstand, der diesen experimentellen Untersuchungen gemein ist, findet sich im vergleichsweise hohen Längsbewehrungsgrad der Prüfkörper, der ein vorzeitiges Biegeversagen zu Gunsten des gewünschten Schubversagens ausschließen soll. Es darf davon ausgegangen werden, dass eine überdimensionierte Längsbewehrung das Tragverhalten implizit beeinflusst. In diesem Kontext stehen nachfolgend vorgestellte experimentelle Untersuchungen des Lehrstuhls für Massivbau der TU München. Neben einer Variation des Längsbewehrungsgrades selbst, wird auch der Einfluss des Vorspanngrades bei geringem Längsbewehrungsgrad an skalierten Versuchskörpern untersucht. Es zeigen sich mit Bezug auf bestehende normative Regelungen zur Nachrechnung von Massivbrücken keine nachteiligen Auswirkungen bei der Abschätzung der Schubtragfähigkeit, wohl aber lassen sich zusätzliche Tragreserven identifizieren.**

**Against the background of specific questions related to prestressed concrete bridges, theoretical and experimental efforts have been intensified in the recent past. In particular, characteristic load-bearing mechanisms of prestressed continuous beams have been discussed and individual parameters have been considered in isolation. A circumstance common to these experimental investigations is the comparatively high degree of longitudinal reinforcement of the test specimens,**

which is intended to exclude premature bending failure in favor of the desired shear failure. It may be assumed that an oversized longitudinal reinforcement influences the load-bearing behavior implicitly. Therefore, the following experimental investigations of the Chair of Solid Structures at the Technical University of Munich are presented and discussed below. In addition to varying the degree of longitudinal reinforcement itself, the influence of the degree of prestressing at a low degree of longitudinal reinforcement is also investigated on scaled test specimens. With reference to existing normative regulations for the recalculation of concrete bridges, no adverse effects are found in the estimation of the shear capacity, but additional load-bearing reserves can be identified.

## Einleitung

Die Nachrechnung von Bestandsbrücken führt häufig aufgrund von stetig gestiegenem Schwerlastverkehr und angepassten Regelwerken zu Defiziten im Querkraftnachweis [1], [2]. In den letzten Jahren wurden deshalb experimentelle Untersuchungen zu mehreren Aspekten der Querkrafttragfähigkeit intensiviert. Innerhalb einiger großer Verbundforschungsvorhaben mit unterschiedlichen Schwerpunkten wurden an vorgespannten Durchlaufträgern mit schwachem Schubbewehrungsgrad Querkraftversuche durchgeführt, um Rückschlüsse auf das Tragverhalten und den Einfluss der wichtigsten Parameter zu gewinnen. Die betrachteten Forschungsschwerpunkte waren:

- Kombinierte Beanspruchung aus Querkraft und Torsion bei vorrangiger Biegung [3]
- Einfluss unterschiedlicher Querschnittsformen [4]
- Anrechenbarkeit nicht-normkonformer Bügelformen auf die Querkrafttragfähigkeit [5]
- Einfluss eines reduzierten Längsbewehrungsgrades und plastischer Gurtverzerrungen [6]
- Einfluss des Vorspanngrades in Bezug auf Beton und Spannstahl [7]

Aufgeführte Untersuchungen dienen der Ausarbeitung und Validierung modifizierter Nachweisformate für die Nachrechnungsrichtlinie bzw. deren Fortschreibung in der BEM-ING [8][9][10].

Im Folgenden werden die experimentellen Untersuchungen und die wesentlichen Erkenntnisse der beiden letztgenannten Untersuchungsschwerpunkte, die am Lehrstuhl für Massivbau der Technischen Universität München in den letzten Jahren bearbeitet wurden, vorgestellt. Die Variation des Längsbewehrungsgrades, der Betondruckspannung aus Vorspannung und der Litzenanzahl beeinflussen die Steifigkeit des gemischt bewehrten Zuggurts und führen zu unterschiedlich hohen Längsverzerrungen, dessen Einfluss im Weiteren erläutert werden soll.

## Experimentelle Untersuchungen

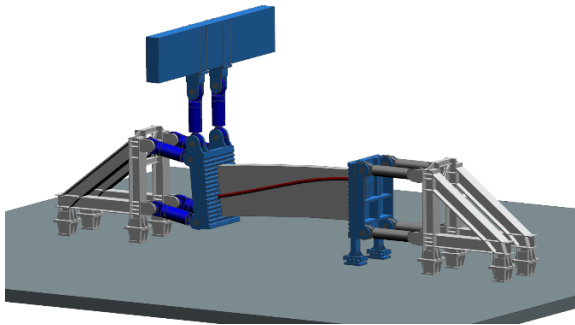
### 1 Substruktur-Technik

Statt durchlaufende Spannbetonträger zu testen, werden in einem eigens dafür entwickelten Versuchsstand Trägerelemente unter Applikation der inneren Schnittgrößen des gewählten Bereichs eines fiktiven Durchlaufträgers geprüft (vgl. Abb. 1). Dazu werden an einer Seite über sechs doppeltwirkende servo-hydraulische Zylinder die gewünschten Randbedingungen über eine massive Lastplatte aufgebracht ( $M, \varphi, V, w, N=0$ ). Auf der anderen Trägerseite findet keine aktive Steuerung statt, die starren Reaktionsstäbe an der Lastplatte nehmen die auftretenden Schnittgrößen ausschließlich auf und leiten Sie über den Reaktionsrahmen in den Spannboden. Die, durch die massive Lastplatte geführte und dahinter verankerte schlaaffe Bewehrung und die verankerten Spannglieder ermöglichen in Kombination mit Schubnocken für den Querkraftabtrag und einem trockenen Druckkontakt zwischen Beton und Lastplatte eine kraftschlüssige Verbindung zwischen Balkenelement und Versuchsstand.

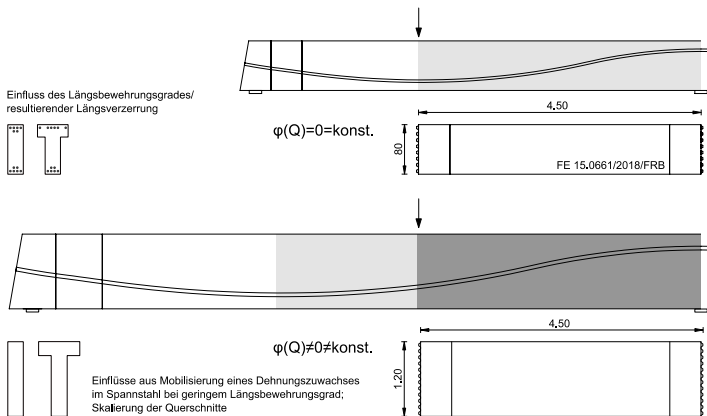
Je nach gewähltem Bereich des Referenzträgers, werden an der aktiv gesteuerten Lastplatte unterschiedliche Schnittgrößen und Deformationen appliziert. Um direkte Druckstreben zu vermeiden und ein Schubversagen zu erreichen, wurde die Schubschlankheit beider vorgestellter Versuchsserien zu  $\lambda \approx 3$  gewählt, wobei der gemischt bewehrte Zuggurt (mit Spannglie-

dern) und die daraus berechnete bezogene statische Nutzhöhe die Schlankheit verringert. In Abb. 2 sind die im weiteren vorgestellten Konfigurationen durchgeführter Versuche dargestellt.

Die Bezeichnung der Versuchskörper enthält in beiden Versuchsserien bereits die wichtigsten Untersuchungsparameter. Es wird die Querschnittsform (Rechteck/T-Querschnitt) und der Durchmesser der Längsbewehrung, sowie die Litzenanzahl (L3/L5/L9) und die Betondruckspannung aus Vorspannung ( $S1.2 = 1,2 \text{ m MPa}$ ) unterschieden.



**Abb. 1:** Versuchskonzept mit Balkenelement und angedeuteter Spannliedführung



**Abb. 2:** Versuchskonfigurationen der beiden vorgestellten Versuchsserien

## **2 Versuche zum Einfluss des Längsbewehrungsgrades**

### **Allgemeines**

Ein Umstand, der bisherigen experimentellen Untersuchungen zum Schubtragverhalten gemein ist, findet sich im hohen Längsbewehrungsgrad der Prüfkörper, der ein vorzeitiges Biegeversagen zu Gunsten des gewünschten Schubversagens ausschließen soll. Eine Versuchsreihe, die in Auszügen nachfolgend vorgestellt wird, untersucht den Einfluss eines sukzessive reduzierten Längsbewehrungsgrades, der die mögliche Längsverzerrung wirtschaftlich bemessener Brückenbauquerschnitte besser approximiert.

### **Versuchsprogramm**

Anhand von acht Substrukturversuchen (vgl. Abschnitt 1) wird der Einfluss des Längsbewehrungsgrades auf die Querkrafttragfähigkeit untersucht. Dabei werden drei abgestufte Längsbewehrungsgehalte mit geripptem Betonstahl an Rechteck- und Plattenbalkenquerschnitt bei ansonsten gleichen Randbedingungen untersucht. Die wesentlichen Daten sind in Tabelle 1 zusammengefasst. Der profilierte Plattenbalkenquerschnitt erlaubt zudem Rückschlüsse auf den Traganteil der Gurte, der auch in Relation zur Steifigkeit des Zugbandes zu sehen ist. Die Länge der Trägerschnitte beträgt inklusive der Vouten (optimierte Kontaktfläche für Lastübertrag via Schubnocken) 4,5 m bei einer Querschnittshöhe von 80 cm. Darüber hinaus wird je Querschnitt ein Tastversuch mit glatter Längsbewehrung durchgeführt, diese Versuche werden im Rahmen des Beitrags jedoch nicht weiter thematisiert. Alle Balkenelemente werden mit ca. 1,0-facher Mindestschubbewehrung ausgeführt. Abb. 3 zeigt alle wesentlichen Positionen der konstruktiven Durchbildung untersuchter Versuchsträger. Alle Träger werden zudem mit Vorspannung im nachträglichen Verbund geprüft, wobei die Vorspannung erst nach Einbau in den Versuchstand aufgebracht wird.

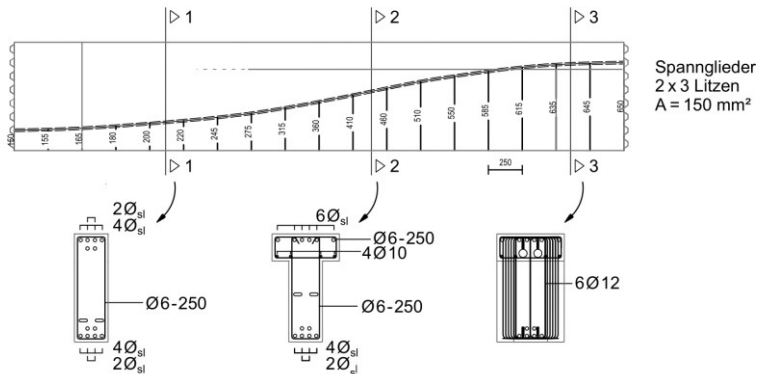
### **Charakteristisches Trag- und Bruchverhalten**

Alle Träger der Versuchsserie mündeten in einem Schubversagen. Das Versagen kann unter Berücksichtigung der gesamten Belastungshistorie als klassisches Biegeschubversagen klassifiziert werden. Unter starker Rissöffnung kommt es zu einem Reißen der Querkraftbewehrung und gleichzeitiger Einschnürung der Druckzone. Insbesondere die Plattenbalkenquerschnitte zeigen vor Erreichen der Bruchlast aber auch vermehrt

unmittelbare Schubzugrisse in bereits gerissenen Druckspannungsfeldern in Feld- und Stützbereichen. Mit Erreichen der Bruchlast lokalisiert sich in einem kritischen Biegeschubriss bzw. einschließendem Schubzugriss die finale Bruchkinematik. Die freiwerdende Energie kann nur durch die Steifigkeit der Gurte bzw. das kreuzende Spannglied gedämpft werden, weshalb der Bruch der Versuche mit geringstem Längsbewehrungsgrad besonders abrupten Charakter zeigt.

**Tabelle 1:** Auszug der Versuchsreihe, Variation des Längsbewehrungsgrades, Betonkennwerte [MPa] und erreichte Bruchlasten [kN]

ID	$\rho_{sl}$ [-] (abs.)	$f_{c,cyl}$	$f_{ct,sp}$	$E_{cm}$	$V_{max}$
R25	0,016 (6D25)	41,9	3,03	28.810	484
R22	0,012 (6D22)	40,3	3,04	29.480	517
R18	0,008 (6D18)	44,4	3,04	28.630	585
T25	0,016 (6D25)	41,9	3,54	27.960	510
T22	0,012 (6D22)	53,7	3,67	31.260	609
T18	0,008 (6D18)	43,8	3,84	28.590	579

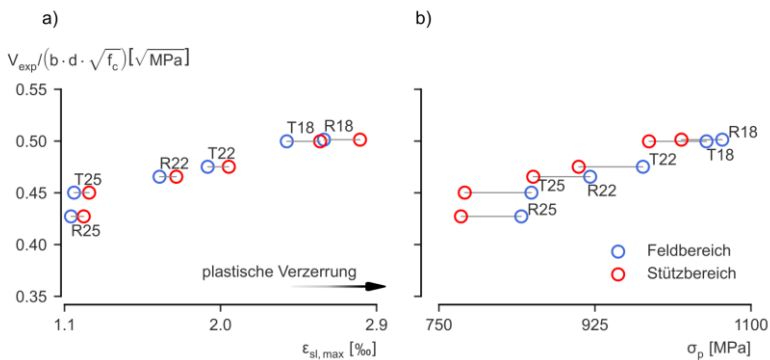


**Abb. 3:** Konstruktive Durchbildung der vorgespannten Balkenelemente, Schnitt 1-1 am Rechteckquerschnitt bzw. Schnitt 2-2 am Plattenbalkenquerschnitt der Spannweite zwischen den Vouten (Schnitt 3-3); Spanngliedgeometrie in der Ansicht

## Wesentliche Ergebnisse

Im Rahmen der betrachteten Versuchsreihe beeinflusst ein reduzierter Längsbewehrungsgrad die Schubtragfähigkeit nicht nachteilig. Trotz stark reduziertem Längsbewehrungsgrad und damit einhergehend starker, teilweise plastischer Verzerrung der schlaffen Bewehrung im Zuggurt, kann das innere Gleichgewicht der horizontalen Kräfte durch die initial moderat vorgespannten Spannglieder gestützt aufrechterhalten werden, sodass eine ausreichende Biegetragfähigkeit zu Gunsten eines vorrangigen Schubversagens sichergestellt werden kann, vgl. Abb. 4.

Das Risswachstum und die Entwicklung der Rissbreiten ist bei derart schwachem Bügelbewehrungsgrad zusammen mit der Duktilität der Bewehrung entscheidend für einen stabilen Fachwerktraganteil, auch wenn dieser vergleichsweise gering ausfällt. So steuert die Verzerrung des Zuggurts die Entwicklung der Rissbreiten abdreher Biegeschubrisse und entscheidet damit auf Basis der Kompatibilität der Verzerrungen im Riss über die Stahlspannung bzw. ein frühzeitiges Reißen des Bügelschenkels, was im Zuge der experimentellen Untersuchungen mehrfach beobachtet werden konnte.



**Abb. 4:** Normierte Querkrafttragfähigkeit bezogen auf a) maximale Verzerrung der schlaffen Längsbewehrung und b) maximale Spannstahlspannung im Bruchzustand für Feld- und Stützbereiche im Anschnitt der Vouten

Sobald im Schubfeld flach geneigte Schubzugrisse einsetzen, nähert sich das System der Traglast, da die Bügel bei derart schwachem Bewehrungs-



grad und geringem Durchmesser keinen rissvernähenden Charakter bereitstellen können, sondern nach initialer Aktivierung direkt Stahlspannungen jenseits der Dehngrenze induziert werden, gefolgt von einem Bügelreißen, das die finale Risskinematik triggert.

### **3 Versuche zum Einfluss des Vorspanngrades**

#### **Allgemeines**

Die experimentellen Untersuchungen der Querkrafttragfähigkeit alter Spannbetonbrücken der letzten Jahre decken bereits eine Vielzahl an Einflussparametern ab, dem Einfluss des rissinduzierten Dehnungszuwachses im Spannglied und der Vorspannung im Allgemeinen wurde jedoch weniger Beachtung geschenkt. Die im Folgenden in Auszügen vorgestellte Versuchsserie fokussiert diese Aspekte im Gesamtbild baupraktisch gewählter Brückenträgerelemente.

#### **Versuchsprogramm**

Im Auszug der Versuchsserie wird mit acht Balkenelementen der Einfluss der Vorspannung auf die Querkrafttragfähigkeit genauer untersucht. Über die absolute Spannkraft wird einerseits die Betondruckspannung aus Vorspannung  $\sigma_{cp}$  variiert. Andererseits wird bei gleicher Spannkraft durch die Litzenzahl einmal eine moderate und einmal eine hohe initiale Ausnutzung des Spannglieds getestet. In Kombination mit dem an reale Brücken angelehnten, gering gewählten Längsbewehrungsgrad werden die möglichen mobilisierbare Dehnungszuwächse im Spannglied und Umlagerungsreserven untersucht. Die Rechteck- und Plattenbalkenquerschnitte werden mit geringem Querkraftbewehrungsgrad im Bereich 1,0-facher Mindestschubbewehrung ausgeführt. Die wichtigsten Versuchsparameter sowie die maximal erreichte Querkraft können Tabelle 2 entnommen werden. Ein Balkenelement mit beiden geprüften Querschnittsformen ist in Abb. 5 dargestellt

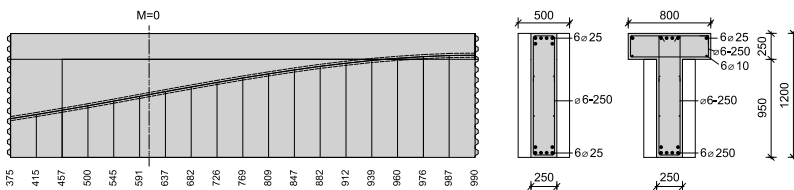
Die Skalierung der Versuchskörper auf eine Höhe von 1,2 m führt bei gleichbleibender Länge des Balkenelements von 4,5 m zu der Wahl eines anderen Schnittufers (vgl. Abb. 2), welches im Referenzträger Rotationen aufweist. Im Versuch wird zur Abbildung der Randbedingungen das Momenten-Querkraft Verhältnis an der Lastplatte aktiv geregelt und damit ein asymmetrischer Momentenverlauf mit dominierendem negativen Moment erzeugt wird. Die Verschiebung des Momentennullpunktes hat zur Folge,

## Längsverzerrung und Querkraft bei vorgespannten Querschnitten – horizontale Kräfte für vertikales Gleichgewicht

dass ausschließlich das, für alte Spannbetonbrücken oft maßgebende Versagen im Bereich des Innenauflegers eines vorgespannten Durchlaufträgers, getestet wird.

**Tabelle 2:** Auszug der Versuchsserie, Variation der Vorspannung [MPa], Betonkennwerte [MPa] und erreichte Bruchlasten [kN]

ID	$\sigma_{pm0}/f_{p0,1k}$	$\sigma_{cp}$	$f_{c,cyl}$	$f_{ct,sp}$	$E_{cm}$	$V_{max}$
R-L5-S1.7	0,44	1,78	42,6	3,6	30.049	775
R-L3-S1.7	0,72	1,76	46,2	3,8	30.157	829
R-L9-S3.1	0,42	3,06	43,7	3,5	27.999	927
R-L5-S3.1	0,74	3,00	43,3	2,8	27.991	982
T-L5-S1.2	0,41	1,15	47,6	3,2	29.727	862
T-L3-S1.2	0,60	1,02	50,4	3,3	30.361	776
T-L9-S2.1	0,36	1,82	48,4	3,8	29.721	971
T-L5-S2.1	0,68	1,90	47,7	3,2	29.641	902



**Abb. 5:** Konstruktive Durchbildung der vorgespannten Balkenelemente, Spann-  
geometrie, Rechteckquerschnitt, Plattenbalkenquerschnitt

### Charakteristisches Trag- und Bruchverhalten

Bei allen Versuchen konnte – trotz einer sehr hohen Dehnung der Biegebewehrung von mindestens 80 % der Dehngrenze – ein klassisches Biegeschubversagen mit markanter Biegeschubrissbildung und starker Beteiligung des Zuggurts festgestellt werden. Das Tragverhalten ist dabei durch fächerartig auftretende Biegeschubrissbildung geprägt, wobei vereinzelt Stegzugrisse vor allem bei den Plattenbalken auftraten. Durch den geringen Biegebewehrungsgrad sind die Versuche durch eine markante Risskinema-

tik charakterisiert. Die große Rissöffnung führt lokal zu großen Dehnungszuwächsen im Spannglied (vgl. Abb. 6a)) und einem Reißen nahezu aller Bügel, die den kritischen Schubriss kreuzen. In Kombination mit dem geringen Längsbewehrungsgrad und der damit allgemein möglichst realitätsnahen konstruktiven Durchbildung eines vergleichbaren Brückenträgers kann gezeigt werden, dass das Spannglied sich auch bei großer Vordehnung und zusätzlich auftretendem lokalen und globalen Dehnungszuwachs maßgeblich am Lastabtrag beteiligt und je nach Rissgeometrie das Tragverhalten nicht nachteilig beeinflusst.

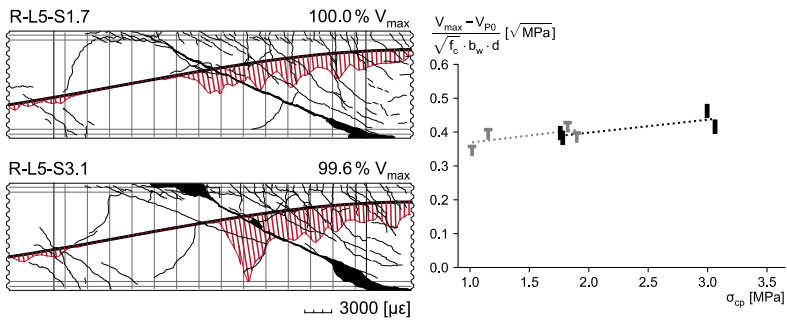
### **Wesentliche Ergebnisse**

Eine initial hohe Vordehnung des Spannglieds führt im Rahmen der durchgeführten Versuche nicht zwangsläufig zu einer Abnahme der Querkrafttragfähigkeit. Je nach Querschnittsform werden weitere Umlagerungen trotz hoch ausgelastetem Spannglied ermöglicht. Die notwendige Kompatibilität der Verzerrungen von Gurt und Steg bestimmen damit das globale Tragverhalten maßgeblich, wodurch der homogene Rechteckquerschnitt ein etwas gutmütigeres Verhalten aufweist.

Das durch Biegeschubrisse geprägte Bruchbild zweier beispielhafter Versuche mit Rechteckquerschnitt und unterschiedlicher Betondruckspannung aus Vorspannung ist zusammen mit der Dehnungsmessung im Hüllrohr mittels robuster faseroptischer Sensoren (DFOS) in Abb. 6a) zu erkennen.

Die nach Belastungsbeginn aufgetretenen Dehnungen sind dazu senkrecht zum Spannglied aufgetragen. Der lokale Dehnungszuwachs infolge Schubrissbildung hebt sich an den Kreuzungspunkten mit dem Spannglied deutlich von dem globalen Zuwachs infolge Biegung ab. Insgesamt zeigt sich eine gute Übereinstimmung der Dehnungsmessung mit dem aufgezeichneten Rissbild. Der über alle Versuche zu erkennende, positive Einfluss der Vorspannung auf die bezogene Tragfähigkeit ist in Abb. 6b – mit abbezogener initialer vertikaler Spannkraft – dargestellt.

## Längsverzerrung und Querkraft bei vorgespannten Querschnitten – horizontale Kräfte für vertikales Gleichgewicht



- a) Bruchbild zweier Balkenelemente mit Dehnungsprofil des Spannglieds      b) Einfluss der Vorspannung auf die bezogene Tragfähigkeit

**Abb. 6:** Einfluss der Vorspannung auf Rissbildung, Dehnung im Riss und Querkrafttragfähigkeit

## 4 Modellvergleich

Abb. 7 zeigt einen Modellvergleich zu vorgestellten Versuchsreihen und der Fortschreibung der Nachrechnungsrichtlinie. Die Tragfähigkeiten werden nach 1. Ergänzung der Nachrechnungsrichtlinie [6] stark unterschätzt, nachdem hier lediglich ein Fachwerktraganteil in Ansatz gebracht wird. Die Fortschreibung der Nachrechnungsrichtlinie [7], die im Zuge der Einführung der BEM-ING anwendbar sein wird, erlaubt auf Basis eines Fachwerkmodells mit additivem Betontraganteil eine signifikant bessere Approximation der Schubtragfähigkeit. Allerdings sind auch hier noch Reserven erkennbar, insbesondere mit Blick auf die Querschnitte mit geringstem Längsbewehrungsgrad oder erhöhten Vorspanngraden. Eine differenzierte Betrachtung bezüglich der untersuchten Querschnittsformen zeigt, dass die Tragfähigkeit von Plattenbalkenquerschnitten nochmals stärker unterschätzt wird bzw. durch den empirischen Betontraganteil der Nachweisformate nicht adäquat beschrieben werden kann.

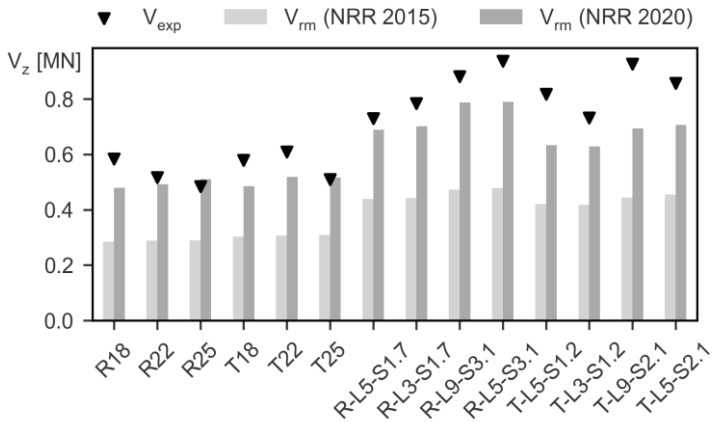


Abb. 7: Modellvergleich der Versuchsreihen

## Fazit

In den Versuchsserien konnte gezeigt werden, dass trotz hoher Längsverzerrung infolge abgestufter Längsbewehrung und bereits initial hoch ausgenutzter Spannlitzen das Querkrafttragverhalten nicht nachteilig beeinflusst wird. Es konnte im Allgemeinen das Verständnis des Querkrafttragverhalten realitätsnah skalierten Querschnitte verbessert werden und die Versuchsdatenlage relevanter Prüfkörperabmessungen und Systemrandbedingungen deutlich erweitert werden. Die vorgestellten Untersuchungen schließen somit eine Lücke, da erläuterte Einflussgrößen so noch nicht an realitätsnah skalierten, vorgespannten Querschnitten experimentell untersucht wurden. Auf Basis eines Fachwerkmodells mit additivem Betontraganteil lässt sich in vielen Fällen bereits eine sehr gute Approximation der Tragfähigkeit auf Stufe 2 der Nachrechnungsrichtlinie bestimmen.

## Literatur

- [1] Nowak, M.; Fischer, O.: Objektspezifische Verkehrslastansätze für Straßenbrücken – ein wichtiger Baustein für erweiterte Beurteilungskonzepte in der Brückennachrechnung. In: Beton- und Stahlbetonbau 112 (2017), Heft 12, S. 804–814.  
<https://doi.org/10.1002/best.201700064>
- [2] Fischer, O.; Müller, A.; Lechner, T. et.al.: Ergebnisse und Erkenntnisse zu durchgeführten Nachrechnungen von Betonbrücken in Deutschland. In: Beton- und Stahlbetonbau 109 (2014), Nr. 2, S. 107–127. <https://doi.org/10.1002/best.201300084>
- [3] Gleich, P.: Das Erweiterte Druckbogenmodell zur Beschreibung des Betontraganteils bei Querkraft, Technische Universität Dortmund, Dissertation, 2020
- [4] Herbrand, M.; Classen, M.; Adam, V.: Querkraftversuche an Spannbetondurchlaufträgern mit Rechteck- und I-Querschnitt. In: Bauingenieur 92 (2017), Heft 11, S. 465–473
- [5] Schramm, N.; Fischer, O.: Zur Anrechenbarkeit von nicht norm-gemäßen Bügelformen auf die Querkrafttragfähigkeit von Bestandsbrücken. In: Bauingenieur. (2020); 95(11), S. 408-418.  
<https://doi.org/10.37544/0005-6650-2020-11>
- [6] Thoma, S; Fischer, O.: Experimental investigations on the shear strength of prestressed beam elements with a focus on the analysis of crack kinematics. Structural Concrete. 2023.  
<https://doi.org/10.1002/suco.202200699>
- [7] Lamatsch, S.; Fischer, O.: Querkraftversuche an unterschiedlich vorgespannten Balkenelementen mit baupraktischen Bauteilabmessungen (In Begutachtung) In: Bauingenieur (2024)
- [8] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS): Richtlinie zur Nachrechnung von Straßenbrücken im Bestand (Nachrechnungsrichtlinie). Berlin, Mai 2011.
- [9] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI): 1. Ergänzung zur Richtlinie zur Nachrechnung von Straßenbrücken im Bestand (Nachrechnungsrichtlinie). Berlin, April 2015
- [10] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI): Teil 2 - Nachrechnung von Straßenbrücken im Bestand: (in Vorbereitung). In: Regelungen und Richtlinien für die Berechnung und Bemessung von Ingenieurbauten (BEM-ING) Entwurf, Bonn, 2021.