
ZUR QUERKRAFTVERSTÄRKUNG VON SPANNBETONTRÄGERN UNTER ZYKLISCHEN LASTEN MIT TEXILBEWEHRTEM SPRITZBETON

SHEAR STRENGTHENING OF PRESTRESSED CONCRETE BEAMS WITH TEX- TILE REINFORCED SPRAYED CONCRETE UNDER CYCLIC LOADING

Martin **Herbrand**, RWTH Aachen, Institut für Massivbau, Aachen, Deutschland
Josef **Hegger**, RWTH Aachen, Institut für Massivbau, Aachen, Deutschland

Ein großer Teil der älteren Autobahnbrücken in Deutschland weist aufgrund der ansteigenden Verkehrslasten rechnerische Querkrafttragdefizite unter statischer und zyklischer Belastung auf. Aus diesem Grund werden zunehmend Verstärkungsmaßnahmen erforderlich, um die zusätzlichen Lasten aufnehmen und kostspielige Neubaumaßnahmen vermeiden zu können. In einem aktuellen Forschungsprojekt des Instituts für Massivbau der RWTH Aachen wird daher die Wirksamkeit einer textilbewehrten Spritzbetonverstärkung auf den Trägerstegen auf die Ermüdungsfestigkeit von Spannbetonträgern zur Entwicklung eines effektiven Verstärkungsverfahrens für Spannbetonbrücken untersucht. Im Rahmen des Projekts werden acht Versuchsträger mit einer Gesamtlänge von jeweils 6,5 m durch zyklische Mehrstufenversuche geprüft. In diesem Artikel werden sowohl Details zur Herstellung der Verstärkungsschicht als auch erste Ergebnisse der Ermüdungsversuche vorgestellt.

A large part of the existing highway bridges in Germany exhibits calculative shear capacity deficits under static and cyclic loading. For this reason, more structures are expected to demand refurbishment and strengthening within the next years in order to account for the higher loads and to avoid expensive new structures. In the current research project of the Institute for Structural Concrete at RWTH Aachen University, the effect of an additional textile reinforced concrete layer on the shear capacity under cyclic loading is investigated. The aim is the development of an effective strengthening procedure for existing prestressed concrete bridges. Eight tests on prestressed concrete beams with a total length of 6,5 m will be tested under cyclic shear loading. This article describes details about the strengthening of the beams as well as preliminary test results.

1. Einleitung

Viele der Bestandsbrücken in Deutschland und anderen europäischen Ländern wurden während der 1960er und 1970er Jahre gebaut [1]. Da die Verkehrslasten in der Zwischenzeit deutlich angestiegen sind [2],[3] und sich die Brücken allgemein in schlechtem Zustand befinden [4], gewinnen Verstärkungsmaßnahmen zunehmend an Bedeutung. Viele der älteren Bestandsbrücken wurden für Querkraft auf Grundlage des Hauptzugspannungskriteriums der DIN 4227 von 1953 bemessen. Da hierbei die Betonzugfestigkeit in Ansatz gebracht wird, ergibt sich keine erforderliche Querkraftbewehrung. Da vor 1969 zusätzlich kein verbindlicher Mindestwert für Querkraftbewehrung festgelegt war, verfügen viele Spannbetonbrücken nicht über die heute erforderliche Querkraftbewehrung in den Stegen [5]. Aus diesem Grund ergeben sich bei Bestandsbauwerken vor allem Probleme im Bereich des Querkraftnachweises [6]. Zur Querkraftverstärkung von Bestandsbauwerken gibt es einige in der Praxis erprobte Verfahren, wie etwa eine zusätzliche externe Vorspannung, zusätzlicher Aufbeton in der Druckzone, zusätzliche Querkraftbewehrung in Schlitzen, Einsatz von Schubnadeln oder

aufgeklebte CFK-Lamellen (carbonfaserverstärkte Kunststoffe). Eine Übersicht über einige der derzeit zur Verfügung stehenden Querkraftverstärkungsverfahren findet sich in [7].

Die jeweiligen Verstärkungsverfahren besitzen verschiedene Vor- und Nachteile. So schützt eine zusätzliche Aufbetonschicht eine eingelegte Betonstahlbewehrung vor Korrosion und Hitze, führt aber durch die erforderliche hohe Betondeckung zu einem erheblichen zusätzlichen Eigengewicht. Eine CFK-Bewehrung ist dagegen sehr leicht, korrosionsunempfindlich und besitzt hohe Festigkeiten, ist gleichzeitig aber aufwändig im Einbau und empfindlich gegenüber Hitzeeinwirkungen.

In einem Forschungsvorhaben am Institut für Massivbau (IMB) sollen daher die Vorteile einer zusätzlichen Aufbetonschicht mit denen einer CFK-Bewehrung verbunden werden. Eine zusätzliche Betonschicht, die mit Carbonfasertextilien bewehrt ist, kann aufgrund der geringeren erforderlichen Betondeckung sehr viel dünner als eine Stahlbetonschicht ausgeführt werden und besitzt gleichzeitig eine hohe Festigkeit. Durch den Einsatz von Spritzbeton ist außerdem der Einsatz auf vertikalen Flächen und somit der direkte Einsatz auf Brückenstege möglich. Zudem kommt ein solches Verstärkungsverfahren ohne größere Eingriffe in die Bausubstanz, wie Schlitzzen oder Durchdringen der Fahrbahnplatte aus.

Textile Bewehrung aus Carbonfasern wurden bereits erfolgreich im Rahmen von Pilotprojekten des IMB an Bauwerken eingesetzt [8],[9]. Eine textilbewehrte Spritzbetonverstärkung könnte also in kritischen Bereichen (i.d.R. Stützbereiche) zur Querkraftverstärkung von Spannbetonbrücken unter vorwiegend ruhenden und nicht ruhenden Lasten eingesetzt werden (Bild 1). Ziel des Forschungsvorhabens ist daher die Entwicklung eines praxistauglichen Verstärkungskonzeptes, das die erforderliche Vorbehandlung des Betons, das Aufbringen der Spritzbetonverstärkung, die Nachbehandlung und die Bemessung der Verstärkung beinhaltet. Im Folgenden werden hierzu die bisherigen experimentellen Untersuchungen an zwei vorgespannten Spannbetonträgern mit und ohne Querkraftbewehrung beschrieben.

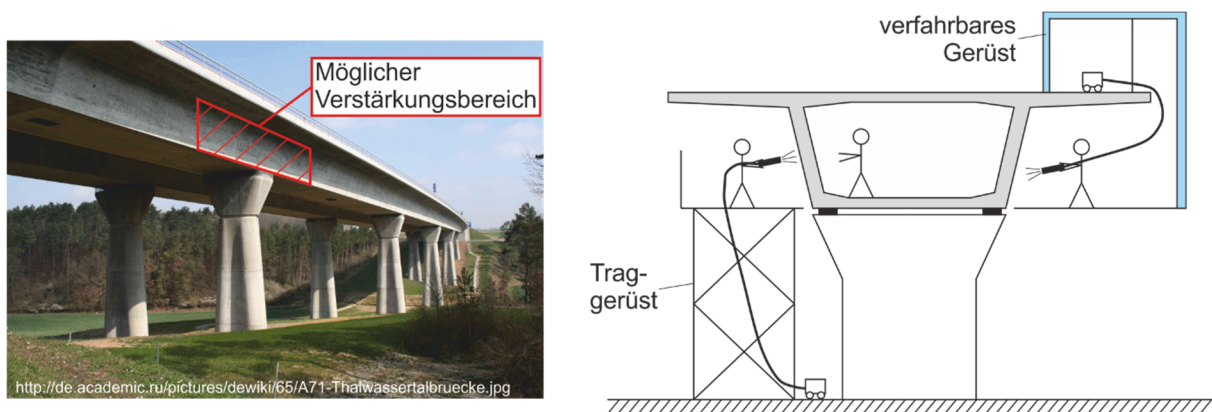


Bild 1: Mögliche Verstärkungsstellen im Auflagerbereich (links) und mögliche Verfahren zur Anbringung der Textilbetonverstärkung (rechts)

2. Experimentelle Untersuchungen

2.1 Voruntersuchungen

Um eine geeignete Kombination von Spritzbeton und Textilbewehrung zu finden, wurden im Vorfeld der Trägerversuche Zugversuche an textilbewehrten Spritzbetonstreifen durchgeführt. Die Spritzbetonstreifen hatten eine Breite von 10 cm, eine Länge von 88 cm und eine Dicke von etwa 2,5 bis 3,0 cm (Bild 2a). Es wurden zwei verschiedene Spritzbetone (Spritzbeton mit einem Größtkorn von 4 mm und polymermodifizierter Spritzbeton (SPCC) mit ei-

nem Größtkorn von 2 mm [10]) in Kombination mit verschiedenen Textilien (alkali-resistente Glasfaser und Carbonfaser), die mit Styrol-Butadien/Epoxidharz getränkt oder ungetränkt waren, getestet. Insgesamt wurden so 13 Versuchsreihen mit insgesamt 32 Versuchen durchgeführt. Für die Verstärkung der hier vorgestellten zwei Versuchsträger wurde eine Kombination von SPCC-Spritzbeton und ungetränktem Textilgelege aus Carbonfaser gewählt (Bild 2b). Die Spannungs-Dehnungslinie der beiden Zugproben ist in Bild 2c dargestellt. Das Textil besitzt eine Fläche von $a_t = 55 \text{ mm}^2/\text{m}$ und wurde bereits erfolgreich für ein vorheriges Projekt verwendet [8]. In Kombination mit dem Spritzbeton wurde eine Textilspannung von 1136 N/mm^2 in den Zugproben erreicht, wobei die Festigkeit einzelner Fasern bis zu 3950 N/mm^2 bei einem E-Modul von 238.000 N/mm^2 betragen kann.

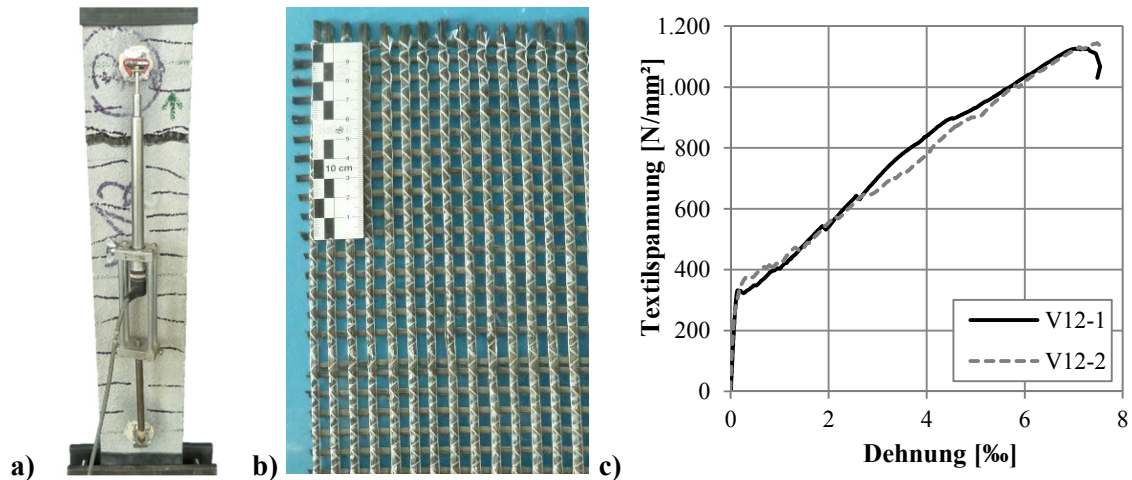


Bild 2: a) Streifenprobe b) ungetränktes Carbontextil c) Spannungs-Dehnungslinien der Versuchsreihe V12

2.2 Trägerversuche

Im Rahmen von Voruntersuchungen wurden zwei Versuchsträger mit und ohne Querkraftbewehrung unter zyklischen Lasten getestet, welche jeweils mit einer textilbewehrten Spritzbetonschicht verstärkt wurden. Die Versuchsergebnisse wurden mit Ergebnissen vorheriger Versuchsserien ohne Textilverstärkung verglichen [11],[12]. Diese waren bis auf die Verstärkung identisch ausgeführt, sodass ein direkter Vergleich möglich war. Der Versuchsaufbau ist in Bild 3 dargestellt. Die Träger hatten eine Gesamtlänge von 6,5 m bei einer Querschnittshöhe von 0,7 m. Die Lasteinleitungspunkte waren in den Drittelpunkten der Träger angeordnet, sodass sich eine Schubschlankheit von $a/d = 3,3$ ergab.

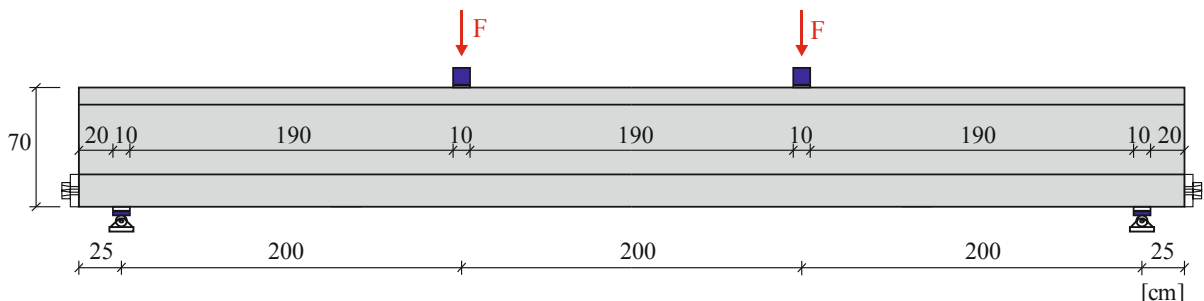


Bild 3: Längssystem der Versuchsanordnung

Die Querschnitte der I-Träger verfügten über eine Gesamtbreite von 0,6 m und eine Stegbreite von 0,1 m. Die Querschnitte der beiden Versuchsträger sind in Bild 4 dargestellt. Der erste Versuch wurde an einem Träger ohne Querkraftbewehrung durchgeführt (I-O-5 TRC, Bild 4a) und der zweite an einem Träger mit geringem Querkraftbewehrungsgrad (M-22-7 TRC, Bild 4b), welcher mit $\rho_w = 0,22\%$ in etwa dem nach heutiger Norm erforderlichen Mindestquerkraftbewehrungsgrad entspricht [13]. Die Träger wurden in Mehrstufenversuchen zwischen 1,2 und 3,1 Mio. Lastwechseln ausgesetzt.

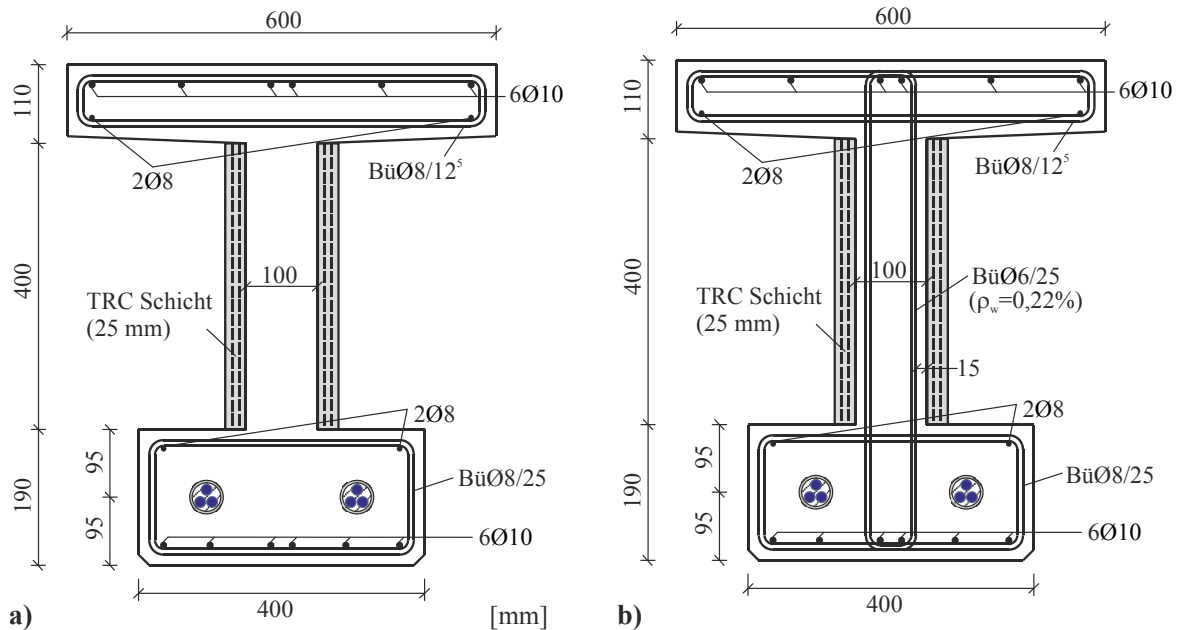


Bild 4: a) Querschnitt ohne Querkraftbewehrung (I-O-5 TRC) b) Querschnitt mit Querkraftbewehrung (M-22-7 TRC)

2.3 Materialeigenschaften

Die Versuchsträger wurden aus normalfestem Beton der Klasse C30/37 mit einem Größtkorn von 8 mm hergestellt. Die Kennwerte der verstärkten Träger sowie der unverstärkten Referenzträger sind in Tabelle 1 zusammengefasst. Dabei sind $f_{cm,cyl}$ die Zylinderdruckfestigkeit, $f_{ctm,BK}$ die zentrische Zugfestigkeit von Bohrkernen, $f_{ctm,sp}$ die Spaltzugfestigkeit an Zylindern und E_{cm} der mittlere E-Modul des Betons. Da die Versuche teilweise mehrere Wochen andauerten, wurden die angegebenen Werte über den Versuchszeitraum gemittelt.

Tab. 1: Materialkennwerte des Betons

Bezeichnung	$f_{cm,cyl}$ [MPa]	$f_{ctm,BK}$ [MPa]	$f_{ctm,sp}$ [MPa]	E_{cm} [MPa]
I-O-5	29,3	2,80	2,54	23000
I-O-5 TRC	42,3	2,98	3,44	26790
M-22-7	31,7	2,55	2,59	24100
M-22-7 TRC	43,0	3,10	3,25	25140

Für die Querkraftbewehrung wurde ein Betonstahl der Festigkeitsklasse B500 verwendet, wobei die gemessene Zugfestigkeit bei 630 N/mm² lag. Für die Vorspannung wurden je Träger zwei Spannglieder mit einer Gesamtfläche von $A_p = 420$ mm² verwendet, welche aus je drei 0,6“-Litzen der Festigkeit St1570/1770 bestanden. Die aufgebrauchte Vorspannkraft betrug bei allen vier Trägern zum Versuchszeitpunkt etwa 320 kN.

Der verwendete Spritzbeton, StoCrete TS 100 von StoCretec [10], ist ein polymervergüteter zementgebundener Trockenspritzmörtel (SPCC) mit einem Größtkorn von 2 mm. Als Betonspritzmaschine kam die Rotormaschine AL-257 des Herstellers Sika zum Einsatz [14], welche im Dünnstromverfahren arbeitet. Die mechanischen Eigenschaften des Spritzbetons wurden an Prismen bestimmt, die versuchsbegleitend gespritzt wurden. Die mittlere Druckfestigkeit, ermittelt an Würfeln mit einer Kantenlänge von 40 mm, ergab sich dabei zu 52 N/mm^2 und die mittlere Biegezugfestigkeit zu $6,9 \text{ N/mm}^2$ (ermittelt an einem Quader mit $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}$). Diese Versuchswerte entsprachen der Festigkeit nach etwa 30 Tagen (es wurden Versuche im Alter von 13 bis 50 Tagen durchgeführt) und erreichten somit nicht ganz den vom Hersteller angegebenen Wert von 65 N/mm^2 für die Druck- und 10 N/mm^2 für die Biegezugfestigkeit nach 28 Tagen.

2.4 Verstärken der Versuchsträger

Die Versuchsträger wurden etwa drei Wochen nach dem Aufbringen der Vorspannung verstärkt. Im ersten Schritt wurde die Oberfläche der Trägerstege durch Sandstrahlen aufgeraut (Bild 5a). Da eine Anwendung des Sandflächenverfahrens nach Kaufmann an den vertikalen Flächen nicht möglich war, wurde die Oberflächenrauigkeit in Anlehnung an das Zementleimverfahren [15] mit Gips bestimmt (Bild 5b), wobei sich Rautiefen zwischen 1,1 und 2,4 mm ergaben. Für die weiteren Versuche ist zusätzlich die Anwendung des in [16] entwickelten Prototyps zur Rauigkeitsmessung auf Grundlage eines laserbasierten Messverfahrens vorgesehen.

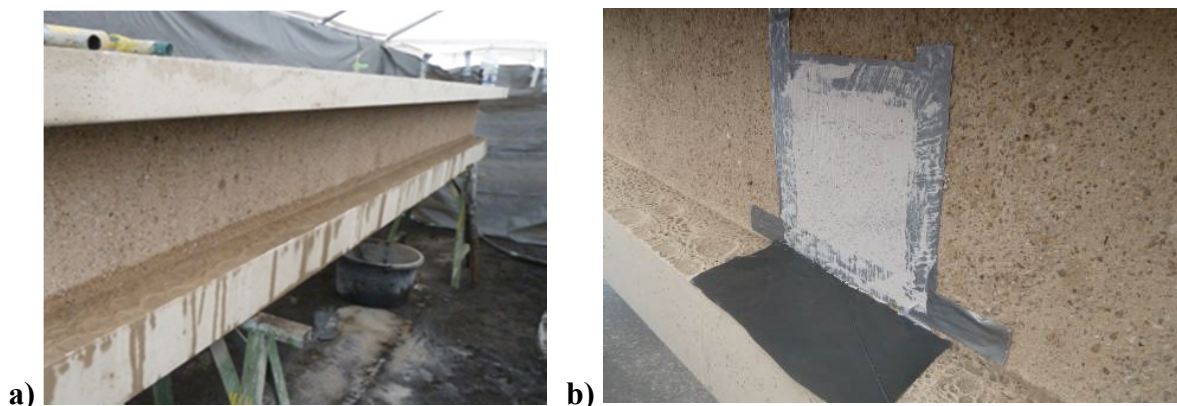


Bild 5: a) Versuchsträger nach dem Sandstrahlen; b) Bestimmung der Rautiefe

Die Stegoberfläche wurde vor dem Aufbringen der Spritzbetonverstärkung ausreichend befeuchtet (Bild 5a). Das Textil wurde anschließend auf jeder Stegseite zweilagig aufgebracht (Bild 6a). Der Spritzbeton wurde im Trockenspritzverfahren mit einer Schichtdicke von jeweils etwa 8 mm aufgetragen (Bild 6b), sodass sich eine Gesamtdicke der Verstärkungsschicht von etwa 25 mm ergab.

Bei der Abstimmung des Verhältnisses von Wasser und Zuschlag wurde eine weiche Konsistenz des Spritzbetons gewählt, um eine gute Durchdringung des Spritzbetons durch das Textil zu erreichen. Nach dem Durchführen der Verstärkungsmaßnahme wurde die Spritzbetonschicht drei Tage befeuchtet um eine gute Hydratation sicherzustellen.

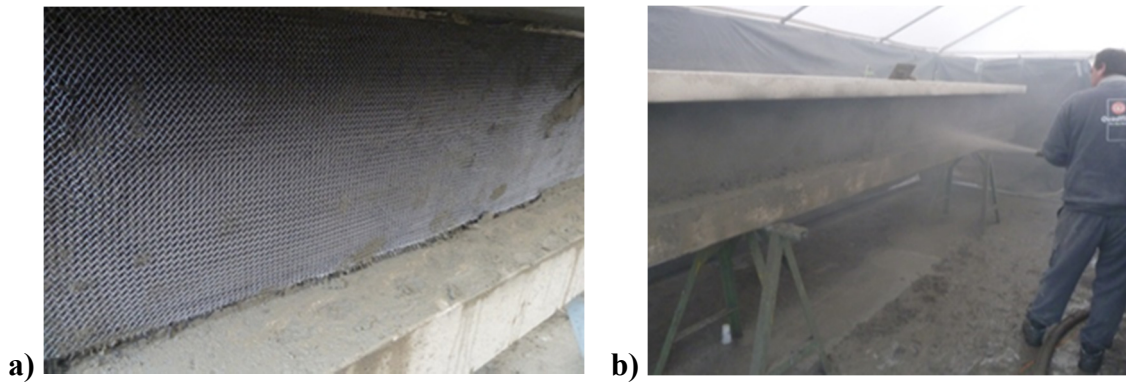


Bild 6: a) Aufbringen der textilen Bewehrung; b) Aufbringen der Spritzbetonschicht

3. Versuchsergebnisse

3.1 Versuchsdurchführung und Messtechnik

Zu Beginn des Versuchs wurden die Versuchskörper bis zur Oberlast V_{\max} belastet. Die zyklischen Lasten wurden dann in Abhängigkeit der Durchbiegung mit einer Frequenz zwischen 1,0 und 2,5 Hz aufgebracht. Die Oberlast der Versuchsträger ohne Querkraftbewehrung wurde mit 75 % der Schuberstrisslast festgelegt, da ein Ermüdungsversagen im Beton, entsprechend nach [12], induziert werden sollte. Die Oberlast der Versuchsträger mit Querkraftbewehrung wurde hingegen als das 1,1-fache der Schuberstrisslast definiert, da hier entsprechend nach [11] ein Bügelversagen in der Querkraftbewehrung hervorgerufen werden sollte. Die in den einzelnen Versuchen gefahrenen Lastwechselzahlen und die zugehörigen Querkraftober- und unterlasten V_{\max} und V_{\min} sind in Tabelle 2 zusammengefasst.

Tab. 2: Lastwechselzahlen und Lastamplituden

Bezeichnung	V_{crack} [kN]	Lastwechsel $\times 10^3$		V_{max} [kN]	V_{min} [kN]	ΔV [kN]
		N_i	ΣN_i			
I-O-5	176	1000	1000	103	47	56
		1011	2011	102	35	67
I-O-5 TRC	188	1000	1000	141	79	62
		180	1180	171	109	62
M-22-7	145	1853	1853	160	103	57
M-22-7 TRC	185	2000	2000	204	147	60
		1100	3100	204	118	86

Aufgrund der großen anfallenden Datenmenge bei Ermüdungsversuchen wurden Messungen in einem Intervall von 5000 Lastwechseln vorgenommen. Die aufbrachte Last wurde über den Zylinderdruck gemessen. Die Verformung der Versuchsträger wurde über zwei Wegaufnehmer in den Drittelpunkten unterhalb der Lasteinleitung ermittelt. Zusätzlich wurde ein photogrammetrisches Messsystem zur Messung des Risswachstums eingesetzt (Bild 7a). Die Hauptspannungszustände wurden durch auf dem Trägersteg angeordnete Wegaufnehmer-Rosetten aufgezeichnet (Bild 7b) und die Bügelspannungen der Träger mit Querkraftbewehrung wurden durch Dehnungsmessstreifen auf den Bügeln erfasst. Die im Versuchsverlauf auftretenden Risse wurden auf dem Träger nachgezeichnet und dokumentiert (Bild 7a).

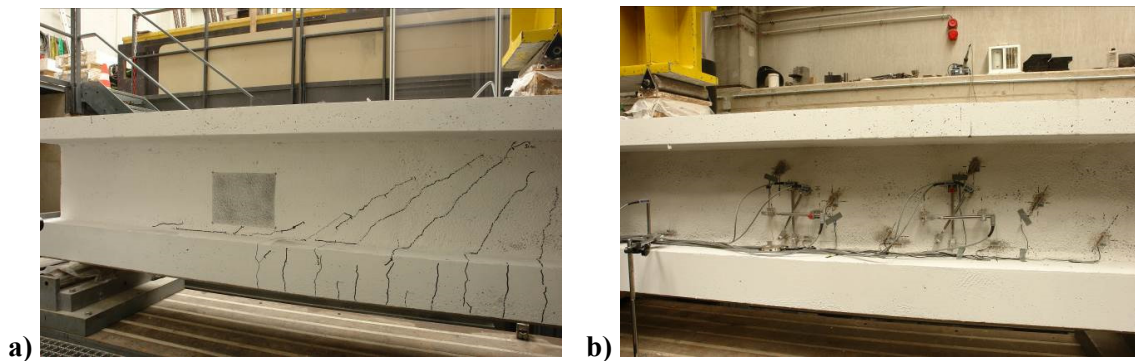


Bild 7: a) Photogrammetrie zur Detektion der Schubrissentwicklung; b) Anordnung der Wegaufnehmer und Dehnungsmessstreifen

3.2 Ergebnisse

Die Durchbiegung der Versuchsträger über die Versuchsdauer ist in Bild 8 dargestellt. Beim Versuchsträger ohne Querkraftbewehrung, I-O-5 TRC, wurde zu Beginn eine 40 % höhere Oberlast als beim unverstärkten Referenzträger I-O-5 aufgebracht (Bild 8a). Aus diesem Grund ergaben sich bei dem verstärkten Träger auch entsprechend höhere vertikale Verformungen. Dennoch zeigten sich beim verstärkten Träger nach einer Million Lastwechseln noch keine Anzeichen eines Ermüdungsversagens. Daraufhin wurde die Oberlast nochmals um 21 % erhöht, bei konstanter Amplitude, und lag nun bei 90 % der Schubrisslast. Unmittelbar nach dieser Laststeigerung bildeten sich Schubrisse im Steg. In allen Ermüdungsversuchen ohne Querkraftbewehrung, die ohne Textilverstärkung hergestellt wurden, trat wenige tausend Lastwechsel nach einer solchen Schubrissbildung ein Ermüdungsversagen des Trägers ein. Der verstärkte Träger war jedoch auch mit ausgeprägtem Rissbild noch in der Lage, weitere 180.000 Lastwechsel zu überstehen. Aufgrund der an diesem Punkt sehr großen Durchbiegungen wurde der Versuch unterbrochen, um die statische Resttragfähigkeit des Trägers I-O-5 TRC zu bestimmen. Hierbei wurde eine Resttragfähigkeit von $V_{ult} = 233$ kN ermittelt, was eine deutliche Laststeigerung gegenüber der zuvor aufgebrachten Oberlast darstellt. Der unverstärkte Träger I-O-5 verfügte dagegen lediglich über eine Resttragfähigkeit von $V_{ult} = 158$ kN. Dies zeigt zum einen, dass die Verstärkung einen deutlich höheren Ermüdungswiderstand für Querkraft bewirkt und sich andererseits ein gutmütiges Ankündigungsverhalten einstellt, sodass eine Schubrissbildung lange vor dem letztendlichen Versagen stattfindet.

Die Oberlast des Versuchskörpers M-22-7 TRC wurde gegenüber dem unverstärkten Versuch um 30 % erhöht. Der Vergrößerung der Durchbiegung des unverstärkten Trägers M-22-7 zeigt, dass dieser bereits unter der niedrigeren Last mehrere Bügelbrüche während der ersten 10^6 Lastwechsel aufweist (Bild 8b). Der verstärkte Versuchsträger zeigt dagegen keine Anzeichen eines Ermüdungsversagens, was auf eine deutliche Entlastung der Bügel und die Textilbetonverstärkung hinweist. Nach $2 \cdot 10^6$ Lastwechseln wurde die Amplitude der zyklischen Last, bei gleich bleibender Oberlast, für weitere $1,1 \cdot 10^6$ Lastwechsel vergrößert, was schließlich zu einem leichten Anstieg der Verformung, allerdings ohne Ermüdungsversagen, führte. Hiernach wurde die Resttragfähigkeit des M-22-7 TRC zu $V_{ult} = 350$ kN ermittelt. Die an einem unverstärkten Referenzträger ermittelte Resttragfähigkeit lag dagegen bei lediglich $V_{ult} = 264$ kN. Es zeigt sich demnach, dass die Textilbetonverstärkung auf den Trägerstegen zu einer deutlichen Entlastung der vorhandenen Querkraftbewehrung führt und somit die Lebensdauer vorhandener Brückenbauwerke deutlich verlängern kann. Im weiteren Projektverlauf müssen allerdings die bisher vorhandenen Bemessungsmodelle für Ermüdung unter Querkraftbeanspruchung um die Möglichkeit der Berücksichtigung einer textilbewehrten Spritzbetonverstärkung erweitert werden.

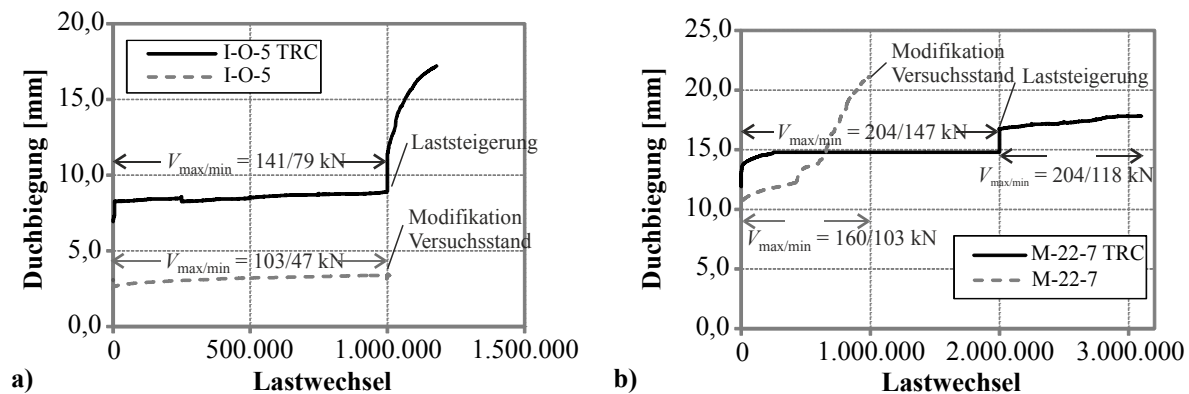


Bild 8: a) Vergleich der Versuche ohne Querkraftbewehrung; b) Vergleich der Versuche mit Querkraftbewehrung

4. Zusammenfassung und Ausblick

Der Einsatz von textilbewehrtem Spritzbeton eröffnet neue Möglichkeiten für die Verstärkung von Bestandsbrücken aus Spannbeton. Das hier vorgestellte zerstörungsfreie Verstärkungsverfahren vereint die Vorteile einer nachträglichen Aufbetonschicht und einer Textilbewehrung. Ein Hauptvorteil des Verfahrens liegt in den flexiblen Anwendungsmöglichkeiten und der geringen Verkehrsbehinderung infolge der Anwendung des Verfahrens. In bisher zwei durchgeführten Trägerversuchen wurde das Verstärkungsverfahren erstmals angewandt und eine deutliche Steigerung der statischen und zyklischen Querkrafttragfähigkeit nachgewiesen. Im weiteren Verlauf des Forschungsvorhabens soll ein praktisches Verstärkungskonzept für Bestandsbrücken entwickelt werden, in dem einerseits praktische Anweisungen und Anforderungen zur Durchführung der Verstärkungsmaßnahme und andererseits Bemessungsmodelle zur quantitativen Bewertung des Verstärkungsgrades enthalten sind.

5. Literatur

- [1] Hegger, J. et al.: Zur Querkraftgefährdung bestehender Spannbetonbrücken - Teil I: Grundlagen. Beton- und Stahlbetonbau 104, 2009, Heft 11, S. 737-746.
- [2] Naumann, J.: Brücken und Schwerverkehr - Eine Bestandsaufnahme. Bauingenieur 85, 2010, Heft 1, S. 1-9.
- [3] Freundt, U.; Böning, S.; Kaschner, R.: Straßenbrücken zwischen aktuellem und zukünftigem Verkehr. Beton- und Stahlbetonbau 106, 2011, Heft 11, S. 736-746.
- [4] Zilch, K.; Weiher, H.: Sicherheit von Spannbetonbrücken – Zustand von Großbrücken im Zuge von Bundesfernstraßen. Bauingenieur 82, 2007, Heft 1, S. 14-24.
- [5] Maurer, R.; Bäättjer, G.: Sicherheit von Spannbetonbrücken – Entwicklung von Konstruktions- und Bemessungsgrundsätzen in Deutschland. Bauingenieur 82, 2007, Heft 1, S. 1-13.
- [6] Fischer, O. et al.: Ergebnisse und Erkenntnisse zu durchgeführten Nachrechnungen von Betonbrücken in Deutschland. Beton- und Stahlbetonbau 109, 2014, Heft 2, S. 107-127.
- [7] Schnellenbach-Held, M.; Peeters, M.; Scherbaum, F.: Sachstand Verstärkungsverfahren – Verstärken von Betonbrücken im Bestand. Berichte der BASt, Heft B75, Bergisch-Gladbach, 2010.
- [8] Scholzen, A.; Chudoba, R.; Hegger, J.: Dünnwandiges Schalentragsystem aus textilbewehrtem Beton. Beton- und Stahlbetonbau 107, 2012, Heft 11, S.767-776.

- [9] Hegger, J.; Goralski, C.; Kulas, C.:
Schlanke Fußgängerbrücke aus Textilbeton. Beton- und Stahlbetonbau 106, 2011, Heft 2, S. 64–71.
- [10] Sto:
Technisches Merkblatt StoCrete TS 100. StoCretec GmbH, Oktober 2012.
- [11] Teworte, F.; Hegger, J.:
Ermüdung von Spannbetonträgern mit Bügelbewehrung unter Querkraftbeanspruchung. Beton- und Stahlbetonbau 108, 2013, Heft 7, S. 475 – 486.
- [12] Teworte, F.; Hegger, J.:
Querkraftermüdung von Spannbetonträgern ohne Querkraftbewehrung. Beton- und Stahlbetonbau 108, 2013, Heft 1, S. 34 – 46.
- [13] DIN-Fachbericht 102 (2009):
Betonbrücken. Beuth Verlag, Berlin.
- [14] Sika:
Kurzbeschreibung Betonspritzmaschine ALIVA-257. Sika Schweiz AG, Widen 2014.
- [15] Momber, A.W.; Schulz, R.R.:
Handbuch der Oberflächenbearbeitung Beton. Birkhäuser Verlag, ISBN 978-3-7643-6218-8, Basel 2006.
- [16] Vogler, N. et al.:
Charakterisierung von Bauteiloberflächen mittels laserbasierter Rauigkeitsmessung. Tagung Werkstoffprüfung, Tagungsband S. 291-296, Neu-Ulm 2013.

Zu den Autoren

Dipl.-Ing. Martin Herbrand

Studium des Bauingenieurwesens an der RWTH Aachen, seit 2011 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Massivbau der RWTH Aachen

mherbrand@imb.rwth-aachen.de

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Josef Hegger

Studium des Bauingenieurwesens an der RWTH Aachen, Dissertation an der TU Braunschweig 1984, 1985 bis 1993 Philipp Holzmann AG, seit 1993 Professor am Institut für Massivbau der RWTH Aachen

jhegger@imb.rwth-aachen.de