Reibermüdung einbetonierter Spannkabel

Fatigue par frottement dans les poutres en béton partiellement précontraint

Institut für Baustatik und Konstruktion
Eidgenössische Technische Hochschule Zürich

J. Oertle, B. Thürlimann

Forschungsauftrag Nr. 51/86; 34041

November 1988

REIBERMüDUNG EINBETONIERTER SPANNKABEL

J. Oertle, dipl. Bauing. ETH und Prof. Dr. Bruno Thürlimann
Eidgenössische Technische Hochschule Zürich

1. Einleitung

Bauteile mit voller Vorspannung weisen in der Regel eine hohe Sicherheit gegen Ermüdungsversagen der Spannstähle auf. Ein Nachweis der Dauerfestigkeit ist ausser in Verankerungsbereichen und bei Koppelstellen von Spanngliedern im allgemeinen nicht erforderlich [1]. Da die Bemessung Zugspannungen im Beton ausschliesst, überschreiten die aus Schwingbelastung entstehenden Spannungsschwingbreiten der Spann- und Bewehrungsstähle den Bereich von $\Delta\sigma = 50$ N/mm² im allgemeinen nicht und sind somit, verglichen mit ihren Dauerfestigkeiten, klein. Demgegenüber können bei teilweiser Vorspannung bereits unter Gebrauchslasten Risse auftreten. Dadurch werden die Spannungsschwingbreiten der Spann- und Bewehrungsstähle bedeutend grösser. Sogar voll vorgespannte Bauwerke können infolge unvorhergesehener Umstände (Setzungen, Schwinden, Temperatureinwirkungen, etc.) an kritischen Stellen Risse aufweisen. Die Spannungsverhältnisse in der Umgebung des Betonrisses sind dann mit denjenigen in teilweise vorgespannten Bauteilen vergleichbar.

Früher beschränkte sich die Forschungstätigkeit meist auf experimentelle Untersuchungen schwingend beanspruchter, teilweise vorgespannter Träger, die im Spannbettverfahren hergestellt worden waren und deshalb gerade verlaufende Spannglieder hatten. Erst zu Beginn der achtziger Jahre kamen systematische Untersuchungen an teilweise vorgespannten Trägern, deren Spannglieder gekrümmt geführt waren und der Verbund nachträglich hergestellt wurde, hinzu [2, 3, 4].

Das Institut für Baustatik und Konstruktion der ETH Zürich forscht seit Jahren auf diesem Gebiet. In verschiedenen Publikationen wurde über Teilprojekte wie Schubbewehrung [5], Ermüdungsfestigkeit nackter Stähle [6], Einfluss der Länge von Spanngliedern [7] sowie Ermüdungsverhalten teilweise vorgespannter Träger [2, 8] berichtet. Im Jahre 1981 wurde eine Versuchsserie von 15 Balken von je 6.7 m Länge begonnen. Bereits die ersten Versuche zeigten völlig überraschend, dass das Ermüdungsverhalten einbetonierter, injizierter Spannglieder wesentlich ungünstiger ist als dasjenige nackter Proben von Spanndrähten und -litzen. Ursache dieses unerwarteten Verhaltens ist hauptsächlich die Reibermüdung, welcher bisher beim Spannbeton keine Beachtung geschenkt worden war. Ein Riss im Träger hat zur Folge, dass in dessen unmittelbarer Umgebung kleine Relativverschiebungen zwischen dem Spannkabel und dem Hüllrohr auftreten. Ist das Spannkabel in diesem Bereich noch gekrümmt, so entstehen durch die Umlenkkräfte bedeutende Querpressungen und entsprechende Reibkräfte an den Kontaktstellen zwischen dem Spannkabel und den Rippen des Hüllrohrs. Die dabei erzeugte Reibung führt zu einer frühzeitigen Ermüdung. Dieses Phänomen ist im Maschinenbau schon länger bekannt [9, 10].

2. Zielsetzung

Um die Reibermüdung in Kabeln teilweise vorgespannter Betonträger genauer abklären zu können, wurde eine neue Versuchsanlage entwickelt. Dabei wurde darauf geachtet, dass im Kleinkörper der Bereich um den Riss der Risszone im teilweise vorgespannten Bauteil, in der Ermüdungsbrüche auftreten, möglichst gut entsprach. Im weiteren wurden übersichtliche statische Verhältnisse angestrebt, damit der Kraftverlauf eindeutig feststand. Die Kleinkörper sollten nicht zu gross und geometrisch einfach geformt sein, um deren Herstellung und Prüfung zu erleichtern, ganz besonders, weil eine grössere Anzahl Kleinkörperversuche geplant wurde, um eine gewisse statistische Absicherung der Versuchsresultate zu erreichen.

Nach Abschluss der Versuche an Kleinkörpern wurde aufgrund der gewonnenen Erkenntnisse eine begrenzte Anzahl Balkenversuche durchgeführt, um neu zu entwickelnde Bemessungskriterien überprüfen zu können.

3. Versuchsdurchführung an Kleinkörpern

Der Kleinkörper wies eine Länge von 1200 mm und einen Querschnitt von 200 x 350 mm auf. Ein nachträglich eingegossenes Stahldruckgelenk legte den inneren Hebelarm zwischen den Druck- und Zugresultierenden eindeutig fest, so dass die Spannungen im Spannstahl exakt bestimmt werden konnten.

Das Hüllrohr wurde während der Betonierphase mit Hilfe eines kreisförmig vorgebogenen Führungsrohres, welches später beim Ausschalen herausgezogen werden konnte, fixiert. Dadurch war der Krümmungsradius - und somit die Querpressung - des Spannkabels definiert. Das Vorspannen der Kleinkörper erfolgte über einen Verankerungskopf mit je drei Schrauben. Die entstehende Vorspannkraft konnte auf beiden Seiten über je eine Kraftmessdose kontrolliert werden. Die freie Aufhängung des Prüfsystems stellte sicher, dass keine Zwängungen auftreten konnten und somit alle auf die Rissregion einwirkenden Kräfte genau bekannt waren.
Die Kleinkörper mit Einzellitze Ø 0.6" oder mit fünf Paralleldrähten Ø 7 mm wurden in der Regel solange geprüft, bis drei Brüche im Spannglied erfolgt waren. Nach einem Drahtbruch wurden beide Kraftgrenzen derart reduziert, dass die Prüfung des restlichen Kabelquerschnittes bei konstanter Spannungsschwingbreite und konstantem Spannungsniveau durchgeführt werden konnte. Würde der Schwingversuch ohne Rücksicht auf erfolgte Drahtbrüche mit konstant gehaltenen Kraftgrenzen gefahren, hätte dies nach jedem Bruch eine sprungartige Erhöhung der Spannungen im verbleibenden Kabelquerschnitt zur Folge.

4. Ergebnisse der Kleinkörperversuche

Bei den Darstellungen der Spannungsschwingbreite über der Lastspielzahl ist speziell zu beachten, dass die Lastspielzahl auf der Abszisse nicht wie üblich im logarithmischen Massstab, sondern im linearen Massstab aufgetragen ist. Bei logarithmischer Auftragung treten die Aenderungen und Vorgänge zu Beginn der Lebensdauer besonders deutlich hervor. In bezug auf das Ermüdungsverhalten von Spannstählen gilt jedoch das Interesse in gleicher Weise der gesamten Lebensdauer.

Bei den Versuchen mit Stahlhüllrohr und einer Litze ging der Ermüdungsanriss der zuerst gebrochenen Drähte regelmässig von den Kontaktstellen zwischen einem Aussendraht und einer Rippe des Hüllrohrs aus. Die folgenden Drahtbrüche hingegen wurden an Kontaktstellen zwischen Aussen- und Zentraldraht erzeugt. Demgegenüber erfolgte bei Versuchen mit Kunststoffhüllrohr der Ermüdungsanriss der gebrochenen Litzendrähte ohne Ausnahme zwischen Aussen- und Zentraldraht. Der Einfluss der Art des Reibpartners ist beachtlich, wenn man die Ermüdungsfestigkeit der Kleinkörper mit Stahlhüllrohr mit derjenigen der Kleinkörper mit Kunststoffhüllrohr vergleicht.

Bei den Versuchen mit fünf Paralleldrähten ging es besonders darum, den Einfluss der Gruppenwirkung so gut als möglich zu beurteilen, um Basiswerte in bezug auf die Ermüdungsfestigkeit für die geplanten Balkenversuche erarbeiten zu können. Aus geometrischen und versuchstechnischen Gründen konnten Spannglieder aus mehr als fünf Einzeldrähten nicht geprüft werden.

Eine grössere Anzahl Versuche mit Stahlhüllrohr sollte die Abschätzung der unteren Grenze der Ermüdungsfestigkeit erlauben. Entsprechend den Versuchen mit Einzellitze ist im Vergleich zu den Versuchen mit Stahlhüllrohr mit der Verwendung eines Kunststoffhüllrohres eine wesentliche Erhöhung der Ermüdungsfestigkeit zu verzeichnen. Bei sämtlichen Versuchen war keine Kontaktstelle zwischen dem Spannglied und dem Kunststoffhüllrohr durchgerieben. Um die Phänomena beim Durchreibevorgang während des Vorspannens kennenzulernen, wurden im Anschluss an die Kleinkörperversuche entsprechende Durchreibeversuche durchgeführt [12].

5. Versuchsdurchführung an Balken

Da die Resultate der neuen Balkenversuche mit denjenigen aus [2] vergleichbar sein sollten, wurden die gleichen geometrischen Abmessungen und die gleiche Bewehrung gewählt. Um örtliche Knickstellen in der Spanngliedführung zu verhindern, wurde das Hüllrohr in Abständen von 50 mm an ein Stützblech mit exaktem Krümmungsradius von r = 3500 mm befestigt.

Der Balken war statisch bestimmt gelagert, und die äussere Belastung wurde über Stahlquerträger in den Balken eingeleitet. Die Kolbenkräfte wurden mit Kraftmessdosen kontrolliert. Um dynamische Einflüsse klein halten zu können, wurde die Belastungsfrequenz auf 5 Hz festgelegt. Zur Verhinderung eines sprungartigen Ansteigens des Spannungsniveaus und der Spannungsschwingbreite nach Drahtbrüchen im restlichen Querschnitt wurden die obere Kraftgrenze wegkontrolliert und die untere Kraftgrenze kraftkontrolliert gesteuert.

Die mit einem Personal Computer (PC) erfassten Werte der Dehnungsmessungen an der Betonoberfläche liessen es zu, die Lastspielzahl bei einem Drahtbruch nachträglich zu bestimmen. Die automatische Ueberwachung der Spitzenwerte erlaubte auch bei Litzenversuchen, Drahtbrüche örtlich festzulegen und deren Lastspielzahl bei Bruch anzugeben.

Im Balken C1 wurde in Trägermitte ein Trennblech eingebaut, um Zugspannungen im Beton zu vermeiden. Es zeigte sich, dass die totalen Vorspannverluste infolge von Reibung, Schwinden, Kriechen und Relaxation etwa 15%

betrugen. Mit der Höhe des gewählten Vorspanniveaus und der Grösse der gewählten Spannungsschwingbreite ergaben sich stets Belastungen, die über dem Dekompressionsniveau lagen. Damit konnte der Einfluss einer Ungenauigkeit in der Bestimmung des Vorspannverlustes auf die Berechnung der Spannungsschwingbreite praktisch vernachlässigbar klein gehalten werden [12]. Wird hingegen beim Schwingen das Dekompressionsniveau durchfahren [2], so wird die Spannungsschwingbreite sehr stark von diesem Niveau und damit von den meistens nur ungenau bekannten Vorspannverlusten abhängig.

6. Ergebnisse der Balkenversuche

Aus der Darstellung der Versuchsergebnisse geht hervor, dass der erste Drahtbruch bei sämtlichen Versuchen erst während der zweiten oder dritten Laststufe erfolgte. Vergleicht man die Bruchlastspielzahlen mit den entsprechenden Werten der Kleinkörperversuche, so stellt man fest, dass die Versuchsresultate sowohl bei Verwendung von Stahl- als auch von Kunststoffhüllrohren gut übereinstimmen. Die in [11] in bezug auf Kleinkörper gemachten Aussagen, wonach im Ermüdungsverhalten einbetonierter Spannglieder aus Litzen oder parallelen Drähten keine ausgeprägten Unterschiede auftreten, bestätigten sich auch in den Balkenversuchen.

Wie bei den Kleinkörperversuchen mit injiziertem Kunststoffhüllrohr traten auch hier keine durchgeriebenen Stellen in der Hüllrohrwandung auf. Im weiteren fiel auf, dass beide Spannglieder mit Kunststoffhüllrohr am Spannstahl einen geringeren Abrieb an den Kontaktstellen aufwiesen als diejenigen mit Stahlhüllrohr. Beim Spannglied des Balkens C4 mit neuentwickeltem Kunststoffhüllrohr [12] waren auf der gesamten Länge des Kabels an der Oberfläche nur kleine Spuren von Reibrost sichtbar.

ZUSAMMENFASSUNG

Das Ausmass der Schädigung schwingend belasteter, gekrümmt geführter Spannglieder durch Reibermüdung hängt wesentlich vom verwendeten Hüllrohrmaterial ab. Für das Vorspannen von Spanngliedern mit nachträglichem Verbund verwendete man früher fast ausschliesslich Hüllrohre aus Stahl. Aus den zahlreichen Versuchen am Institut für Baustatik und Konstruktion der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich ging hervor, dass sich im Bereich von Biegerissen Reibstellen zwischen dem Spannstahl und den Rippen des Hüllrohrs ausbilden. Diese sind für die frühzeitig auftretende Reibermüdung an der Spannstahloberfläche verantwortlich. Aus diesem Grund wurden die Verwendung von Kunststoffhüllrohren näher untersucht und eine neue Form der Hüllrohrwandung entwickelt. Der Wandstärke als wichtigster Bemessungsgrösse für Kunststoffhüllrohre wurde besondere Beachtung geschenkt. Um die Durchreibgefahr der Hüllrohrwandung während des Vorspannens abschätzen zu können, wurde eine Versuchsanordnung für die Durchreibprüfung entwickelt.

Bei schwingend belasteten, teilweise vorgespannten Tragwerken treten im Spannkabel nebst der Beanspruchung aus Reibermüdung örtliche Spannungsspitzen auf, die sich den Spannungsschwingbreiten aus schwingender Belastung überlagern. Dadurch treffen an der Reibstelle des Spannstahls das zerrüttete Gefüge und die Spannungsspitzen zusammen. Die sich daraus ergebenden örtlichen Spannungsverhältnisse im Spannglied wurden näher untersucht.

Die der Kabelkraft im Krümmungsbereich entgegengesetzten Reibkräfte zwischen dem Spannglied und den Rippen des Hüllrohrs führen zu einem steilen Abfall der Spannungsschwingbreite in Spanngliedlängsrichtung. Die Grösse dieser Reibkräfte wird von den örtlichen Querpressungen und der Grösse des Reibbeiwertes beeinflusst. Im weiteren werden die Spannungen im Spannglied durch die Verbundwirkung zwischen den Spanndrähten und dem umgebenden Injektionsgut abgebaut. Aus der Untersuchung geht hervor, dass infolge des steilen Spannungsabfalles im Rissbereich des Bauteils die Spannungsschwingbreite im Spannkabel nicht anhand von Dehnungsmessungen an der Betonoberfläche ermittelt werden kann. Die übliche Basislänge von 200 bis 300 mm ist für solche Messungen im Verhältnis zur örtlich rasch abklingenden Spannungsschwingbreite viel zu gross und liefert daher lediglich einen Durchschnittswert, der die Spitze der Spannungsschwingbreite im Rissquerschnitt stark unterschätzt.

Die ertragbare Ermüdungsfestigkeit gekrümmt geführter Spannkabel in injizierten Stahlhüllrohren liegt für $N = 2 \cdot 10^6$ Lastspiele im Bereich von $\Delta\sigma = 120$ bis 190 N/mm^2. Die Grösse der Spannungsschwingbreite hängt für Spannkabel in Stahlhüllrohren vorwiegend von der örtlichen Querpressung ab. Dabei ergeben sich keine ausgeprägten Unterschiede zwischen Spannkabeln aus Litzen oder parallelen Drähten. Zufällige, nicht kontrollierbare Schwankungen der Querpressung, die selbst bei sorgfältig verlegten Hüllrohren auftreten können, verdecken mögliche Unterschiede. Demgegenüber wird die Ermüdungsfestigkeit von Spannkabeln aus Litzen oder parallelen Drähten in entscheidendem Mass durch die Art des Hüllrohrmaterials bestimmt. Die Verwendung von Kunststoff anstelle von Stahl führt praktisch zu einer Verdoppelung der ertragbaren Spannungsschwingbreite. Währenddem Stahlhüllrohre im Bereich der Krümmung oft kantige Rippen aufweisen, die zu hohen Spannungskonzentrationen in den dort anliegenden Spanndrähten führen, können Kunststoffhüllrohre kleinere Knickstellen durch örtliches Verdrängen von Material ausgleichen. Um die Durchreibgefahr von Kunststoffhüllrohren während des Gebrauchszustandes auszuschliessen, dürfen diese nur im

injizierten Zustand verwendet werden, damit die örtlich auftretende Relativverschiebung zwischen Spannglied und Hüllrohrwandung im Rissbereich des Bauteils möglichst klein bleibt.

Abschliessend soll nochmals mit Nachdruck darauf hingewiesen werden, dass nur eine Eliminierung der Reibermüdung die Sicherheit von Bauwerken entscheidend erhöht. Dies kann erreicht werden, indem für schwingend beanspruchte Bauwerke mit teilweiser Vorspannung Kunststoffhüllrohre verwendet werden. Damit wird zusätzlich ein dauerhafter Schutz des Spannkabels gegen korrosive Einwirkungen erreicht.

RESUME

L'ampleur des dégats provoqués par la fatigue par frottement dans un câble de précontrainte courbé et sollicité de façon cyclique dépend essentiellement du matériau de gaine utilisé. Dans presque toutes les applications antérieures de la précontrainte par post-tension des gaines en acier ont été utilisées. De nombreux essais ont révélé que des zones de frottement entre l'acier de précontrainte et les nervures de la gaine se produisent près des fissures engendrées par les moments de flexion. La fatigue au frottement à la surface du câble de précontrainte est le résultat de ces zones de frottement.

Afin d'éviter la fatigue, l'emploi de gaines en plastique a été proposé. Le comportement de gaines en plastique a été étudié à l'Institut de Statique et Construction à l'Ecole Polytechnique Fédérale de Zurich et un nouveau profil de paroi développé. L'épaisseur de la parois s'est avéré le plus important paramètre pour le dimensionnement de la gaine. Une installation d'essais à l'usure par frottement a été élaborée afin d'estimer le danger d'usure de la parois de la gaine lors de la mise en précontrainte.

La fatigue par frottement engendre des concentrations de contrainte locales, qui se superposent aux contraintes dues à la sollicitation cyclique. Les dégats à l'acier de précontrainte dues au frottement et les concentrations de contrainte se manifestent donc au même endroit. On a donc étudié en plus grand détail les contraintes locales dans le câble.

Les forces supplémentaires produites par le frottement du câble contre les nervures de la gaine agissent dans le sens opposé à la force dans le câble dans la zone de courbure. Ceci provoque une chute rapide dans la différence de contraintes dans la direction longitudinale. L'ampleur de ces forces supplémentaires est influencée par les pressions latérales de la valeur du coefficient de frottement. Les contraintes dans le câble sont aussi réduites par l'adhérence des fils de précontrainte dans le matériau d'injection. L'étude révèle l'impossibilité de déterminer la différence de contraintes dans le câble par les déformations unitaires mesurées à la surface du béton, à cause de la réduction rapide de contrainte dans la zone fissurée de la poutre. La longueur de base normale, 200 à 300 mm, est beaucoup trop grande pour de telles mesures, relative à la diminution locale de la contrainte, et ne peut fournir que des valeurs moyennes qui sousestiment considérablement la contrainte maximale à la section fissurée.

La différence de contrainte supportable pour $2 \cdot 10^6$ cycles de charge se situe entre 120 et 190 N/mm^2 pour un câble de précontrainte dans une gaine d'acier injectée. La différence de contrainte admissible est essentiellement une fonction de la pression latérale locale.

Aucune différence notable n'a été observée dans le comportement de fils parallèles de torons en ce qui concerne la fatigue par frottement. Toute différence entre le comportement de fils et de torons est dissimulée par des variations aléatoires inévitables dans la pression latérale, qui peuvent se produire même quand le câble est mis en place avec soin. La résistance à la fatigue de câbles de torons ou de fils est déterminée en grande partie par le matériau de gaine utilisé. L'emploi du plastique au lieu de l'acier conduit à une différence de contrainte supportable presque deux fois plus grande. Les nervures dans les gaines en acier sont parfois aigues et peuvent provoquer de grandes concentrations de contraintes dans les fils voisines. Les gaines en plastique, cependant, peuvent compenser ces effets par un déplacement de matériau. Les gaines en plastique

devraient toujours être injectées, afin de prévenir l'usure durant l'utilisation. Ceci aura l'effet de maintenir les déplacements relatives des fils et des parois de la gaine aussi petits que possible dans les zones fissurées.

La sécurité de la construction ne peut être assurée que par l'élimination de la fatigue par frottement. Ceci peut être réalisé dans des constructions en béton partiellement précontraint soumises aux sollicitations cycliques avec l'emploi de gaines en plastique. Les gaines en plastique fournissent en plus une protection contre la corrosion améliorée.

Literatur

[1] Warner R.F., Hulsbos C.L., "Probable Fatigue Life of Prestressed Concrete Beams ", Journal of the Prestressed Concrete Institute, Vol. 11, No.2, 1966.

[2] Rigon C., Thürlimann B., "Fatigue Tests on Post-Tensioned Concrete Beams", Institut für Baustatik und Konstruktion, ETH Zürich, Versuchsbericht Nr. 8101-1, August 1985, Birkhäuser Verlag Basel.

[3] Müller H.H., "Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben: Prüfverfahren für die Dauerschwingfestigkeit von Spannstählen", Technische Universität München, Institut für Bauingenieurwesen III, Nr. 1111, Mai 1985.

[4] Cordes H., "Dauerhaftigkeit von Spanngliedern unter zyklischen Beanspruchungen", Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Institut für Massivbau, Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 370, Berlin 1986.

[5] Frey R., Thürlimann B., "Ermüdungsversuche an Stahlbetonbalken mit und ohne Schubbewehrung", Institut für Baustatik und Konstruktion, ETH Zürich, Versuchsbericht Nr. 7801-1, September 1983, Birkhäuser Verlag Basel.

[6] Fernandez-Canteli A., Esslinger V., Thürlimann B., "Ermüdungsfestigkeit von Bewehrungs- und Spannstählen", Institut für Baustatik und Konstruktion, ETH Zürich, Versuchsbericht Nr. 8002-1, 1984, Birkhäuser Verlag Basel.

[7] Castillo E., Fernandez-Canteli A., Esslinger V., Thürlimann B., "Statistical Model for Fatigue Analysis of Wires, Strands and Cables", International Association for Bridge and Structural Engineering (IABSE), Zürich, IABSE Periodica 1, 1985.

[8] Oertle J., Thürlimann B., Esslinger V., "Versuche zur Reibermüdung einbetonierter Spannkabel", Institut für Baustatik und Konstruktion, ETH Zürich, Versuchsbericht Nr. 8101-2, Oktober 1987, Birkhäuser Verlag Basel.

[9] Waterhouse R.B., "Fretting Fatigue", Applied Publishers Ltd., London, 1981.

[10] Kreitner L., "Die Auswirkung von Reibkorrosion und von Reibdauerbeanspruchung auf die Dauerhaltbarkeit zusammengesetzter Maschinenteile", Technische Hochschule Darmstadt, Dissertation, 1976.

[11] Oertle J., Thürlimann B., "Reibermüdung einbetonierter Spannkabel", Schweizer Ingenieur und Architekt 12, März 1987.

[12] Oertle J., "Reibermüdung einbetonierter Spannkabel", Institut für Baustatik und Konstruktion, ETH Zürich, Dissertation, September 1988, Birkhäuser Verlag Basel.