

27. Mai 2010
. Ausfertigung

Kurzbericht

<u>Auftraggeber</u>	Deutsches Institut für Bautechnik Kolonnenstr. 30 L 10829 Berlin
<u>Förderkennzeichen</u>	ZP 52-5- 7.294-1342/09
<u>Vorhabensbezeichnung</u>	Dauerschwingfestigkeit von Spannstählen unter dynamischer Beanspruchung im eingebauten Zustand
<u>Laufzeit des Vorhabens</u>	01.11.2009 – 30.05.2010
<u>Zuwendungsempfänger</u>	TU Braunschweig Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz Univ.-Prof. Dr.-Ing. M. Empelmann Beethovenstraße 52 38106 Braunschweig ☎ (05 31) 3 91-54 13; Fax -81 79 E-Mail: massivbau@ibmb.tu-bs.de
<u>Bearbeiter</u>	Dipl.-Ing. Christoph Sender ☎ (05 31) 3 91-55 06; Fax -81 79 E-Mail: c.sender@ibmb.tu-bs.de

Der Kurzbericht umfasst 9 Seiten.

1 Einleitung und Ziel des Forschungsvorhabens

Tragende Bauteile, die Spannungsänderungen unter nicht vorwiegend ruhenden Einwirkungen unterworfen sind, sind gegen Ermüdung zu bemessen. Hierzu werden dem entwerfenden Ingenieur in der derzeitigen DIN 1045-1 [22] verschiedene Nachweisverfahren (vereinfachter Nachweis, expliziter Betriebsfestigkeitsnachweis, Nachweis gegen Ermüdung über schädigungsäquivalente Spannungsschwingbreiten) angegeben. Der Nachweis gegen Ermüdung gilt als erbracht, wenn die schädigungsäquivalente Spannungsschwingbreite auf der Einwirkungsseite (zusammen mit den Teilsicherheitsbeiwerten) kleiner als die Spannungsschwingbreite für die betreffende Lastzyklenzahl aus der Wöhlerlinie (dividiert durch einen Teilsicherheitsbeiwert) ist. In Tabelle 17 der DIN 1045-1 [22] sind die Parameter der Wöhlerlinien für Spannstahl angegeben und gelten für den eingebauten Zustand im sofortigen und nachträglichen Verbund.

Die Berechnung der Dauerschwingfestigkeit von Spannstählen unter dynamischer Beanspruchung im eingebauten Zustand gewinnt z. B. im Rahmen zunehmender Verkehrsbeanspruchungen, einer längeren Lebensdauer von Bauwerken, aber auch durch die Verwendung von innovativen und hochfesten Baustoffen zunehmend an Bedeutung. Letzteres führt u. a. zu schlankeren, höher dynamisch beanspruchten Bauwerken und Bauteilen mit beträchtlichen Spannungsänderungen im Spannstahl.

Das Ziel des Forschungsvorhabens ist es, einen Sachstandsbericht zur Dauerschwingfestigkeit von Spanngliedern unter dynamischer Beanspruchung im eingebauten Zustand zu erstellen, wobei auch Spannglieder im sofortigen Verbund betrachtet werden sollen.

2 Sichtung der vorhandenen Literatur

Zur Thematik der Dauerschwingfestigkeit wurden zahlreiche experimentelle Untersuchungen im nationalen und internationalen Raum durchgeführt. Grundsätzlich ist zu unterscheiden zwischen Spannstahl in nachträglichem und sofortigem Verbund. Beim nachträglichen Verbund kann weitergehend unterschieden werden in Untersuchungen an Kleinmodell- und Großmodellen.

2.1 Untersuchungen zum nachträglichen Verbund

Die Ergebnisse der Kleinmodellversuche zum nachträglichen Verbund zeigen folgende Erkenntnisse auf:

- Eine Reibung und Querpressung zwischen Spannstahl und Stahlhüllrohr führt zu einer Abminderung der Dauerschwingfestigkeit unter dynamischer Beanspruchung auf etwa 45-65% der Werte von frei schwingenden Proben [6], [7], [17]. Spannstahlbrüche gingen dabei immer von der Kontaktstelle „Spannstahl-Stahlhüllrohr“ aus [6], [7].
- Bei Verwendung von Kunststoffhüllrohren konnte – gegenüber von Stahlhüllrohren – eine Verdopplung der ertragbaren Schwingbreite festgestellt werden [17]. Einerseits traten Beschädigungen am Spannstahl infolge Reibung zwischen Spannglied und Einpressmörtel auf [14]. Andererseits konnte in Versuchen ein Versagen innerhalb des Spanngliedes, d. h. an der Kontaktstelle „Spannstahl-Spannstahl“ [17] festgestellt werden.

Die durchgeführten Großmodellversuche zum nachträglichen Verbund lassen folgende Schlussfolgerungen auf die Dauerschwingfestigkeit von eingebauten Spannstählen zu:

- Wird während der dynamischen Belastung das Dekompressionsniveau durchfahren, ist eine präzise Angabe der ertragbaren Schwingbreite nicht möglich [5], [1], [18], [12].
- Nach Müller [13] ist eine proportionale Abminderung der Dauerschwingfestigkeit des eingebauten Spannstahls von den bei den Zulassungsversuchen an freien Proben ermittelten Werten nicht möglich.
- Der Versagensort der Spannglieder konnte in der überwiegenden Mehrzahl der Versuche aufgrund einer punktförmig konzentrierten Reibdauerbeanspruchung an den Kontaktstellen zwischen Spannglied und Stahlhüllrohr lokalisiert werden [5], [9], [19], [17].
- Nach Abel, Hegger und Oertle [1], [10], [17] hat die Höhe der Querpressung der Spannglieder untereinander einen maßgebenden Einfluss auf die Ermüdungsfestigkeit des Spannstahls.
- Die ertragbaren Lastspielzahlen sind bei großen Spannungsamplituden und der Verwendung von Kunststoffhüllrohren nur unerheblich größer als bei Verwendung von Hüllrohren aus Bandstahl [1]. Bei kleinen Spannungsamplituden sind hingegen die ertragbaren Spannungsamplituden bei Verwendung von Kunststoffhüllrohren deutlich größer als bei Hüllrohren aus Bandstahl [1], [9], [17].
- Der Einsatz von großen Spanngliedern mit entsprechend hohen Querpressungen führt zu einer Angleichung des Ermüdungsverhaltens von Spanngliedern in Kunststoffhüllrohren zu dem von Spanngliedern in Stahlhüllrohren, da die Reibbeanspruchung der Litzenlagen untereinander maßgebend wird [1], [9].
- An den Berührstellen von Drähten untereinander bilden sich unabhängig vom verwendeten Hüllrohr Reibkorrosionsspuren, die zu einer Herabsetzung der Ermüdungsfestigkeit beitragen [1].
- Nach Abel wird durch den Bruch eines Drahtes ein Reibpartner geschaffen, der die Ermüdungsfestigkeit von umliegenden Drähten maßgeblich bestimmt und somit zu einer Konzentration von Drahtbrüchen beitragen kann [1].
- Nach Bökamp [5] führt eine künstliche Bewitterung der Versuchskörper mit Leitungswasser zu zeitlich später erfolgenden Ermüdungsbrüchen. Eine Prüfung unter trockenen Randbedingungen stellte sich als maßgebend für die Ermittlung der ertragbaren Schwingbreite heraus [5], [19].

2.2 Untersuchungen zum sofortigen Verbund

Untersuchungsergebnisse an Großmodellversuchen mit Spanngliedern im sofortigen Verbund liegen nur spärlich vor. Die vorhandenen Untersuchungen sind einerseits aufgrund fehlender oder ungenauer Angaben für eine detaillierte Auswertung ungeeignet. Andererseits wird die verwertbare Anzahl durch die Problematik des Durchfahrens des Dekompressionsniveaus weiter reduziert. Eine Auswertung bzgl. der Versagenscharakteristik ist möglich. Es kann aber festgehalten werden:

- Ein Ermüdungsversagen durch nacheinander folgendes sprödes Versagen einzelner Drähte der Litzen konnte in Versuchen festgestellt werden [2], [3], [4].
- Nach Abeles ist solange guter Verbund vorliegt, ist ein höherer Widerstand gegen Ermüdung gegeben. Bei schlechtem Verbund hingegen und bei Vorliegen großer Rissbreiten liegt ein schlechteres Ermüdungsverhalten vor, da neben der Ermüdung des reinen Spannstahls (wie bei frei schwingenden Proben) zusätzlich Reibung zwischen dem Spannstahl und dem Beton auftritt, wodurch die Dauerschwingfestigkeit beeinträchtigt wird.

- Einige Versuche zeigten durch Reibeinflüsse zwischen Spannstahl und Beton eine Reduktion der Ermüdungsfestigkeit auf 40-90% der ertragbaren Lastspielzahlen von frei schwingenden Proben unter vergleichbaren Schwingbreiten [2], [3], [4], [11].
- Nach Bökamp [5] haben Reibeinflüsse zwischen Spannstahl und Bügelbewehrung keinen negativen Einfluss auf die Dauerschwingfestigkeit. Es konnte im Wesentlichen nur eine geringfügige Abweichung der ertragbaren Schwingbreite von den im frei schwingenden Zustand geprüften Spannstahlproben feststellen
- Bei Einsatz einer polygonförmigen Spanngliedführung und Einsatz von Umlenkkonstruktionen (sog. Hold-Downs) wird die Dauerschwingfestigkeit durch die Reibermüdung bzw. Reibkorrosion zwischen Spannglied und Umlenkkonstruktion auf ca. 35% reduziert [15], [16].

3 Einflussgrößen

Auf Grundlage der Sichtung wurden die Untersuchungen in einer Datenbank zusammengestellt und hinsichtlich der maßgebenden Einflussgrößen auf die Dauerschwingfestigkeit von eingebauten Spanngliedern analysiert.

Einflussgröße	Einflussparameter	Materialgüte	Nachträglicher Verbund								Sofortiger Verbund				
			Abel	Bökamp	Oerle	Eskola	Hegger	Müller	Rigon	Voß/Falkner	Voß/Kordina	Bökamp	Heller	Müller	
Spannstahl	Spannstahlitzen	St 1570/1770													
		UTS 2010 / UTS 2025													
	Spannstahldrähte	St 835/1030													
		St 1470/1670													
		St 1420/1570													
	St 1520/1670														
	Bündelspannglieder	St 1570/1770													
	Gewindestahl	St 1080/1230													
Betongüte	Normalfeste Betone	C30/37													
		C35/45													
		C40/50													
		C45/55													
	Hochfeste Betone	C50/60													
		C55/67													
		C60/75													
	C70/85														
Reibpartner	nachträglicher Verbund														
	Spannstahl – Stahlhüllrohr														
	Spannstahl – Kunststoffhüllrohr														
	Spannstahl – Einpressmörtel														
	Spannstahl – Spannstahl														
	sofortiger Verbund														
	Spannstahl – Beton														
Vorspannung	Spannungsniveau	0,55 fpk										k. A.	k. A.	k. A.	
		0,60 fpk													
		0,65 fpk													
		0,75 fpk													
	Schwingbreite	≤100 MN/m ²													
		>100 - 200 MN/m ²													
		>200 - 300 MN/m ²													
> 300 MN/m ²															
Dekompressionsniveau der Versuche		oberhalb durchfahren													
Spanngliedführung		gekrümmt													
		polygonal													
		gerade													
dynamische Beanspruchung	Belastungsfrequenz	< 1 Hz											k. A.		
		1-3 Hz													
		4-5 Hz													
Umweltbedingungen	Belastungsgeschichte	Trocken													
		Feucht													

Die vorangehende Tabelle gibt einen Überblick über die Einflussgrößen, die Einflussparameter und die vorliegenden Untersuchungen. Die hellgrauen Felder in der Tabelle markieren Untersuchungsergebnisse in denen eine genaue Angabe der Schwingbreite und der ertragbaren Lastspielzahl aufgrund des Durchfahrens des Dekompressionsniveaus bzw. dem aufeinander folgendem Aufbringen von Laststufen mit Unsicherheiten behaftet ist. Die dunkelgrau hinterlegten Felder geben Untersuchungen mit eindeutigen und aussagekräftigen Ergebnissen an.

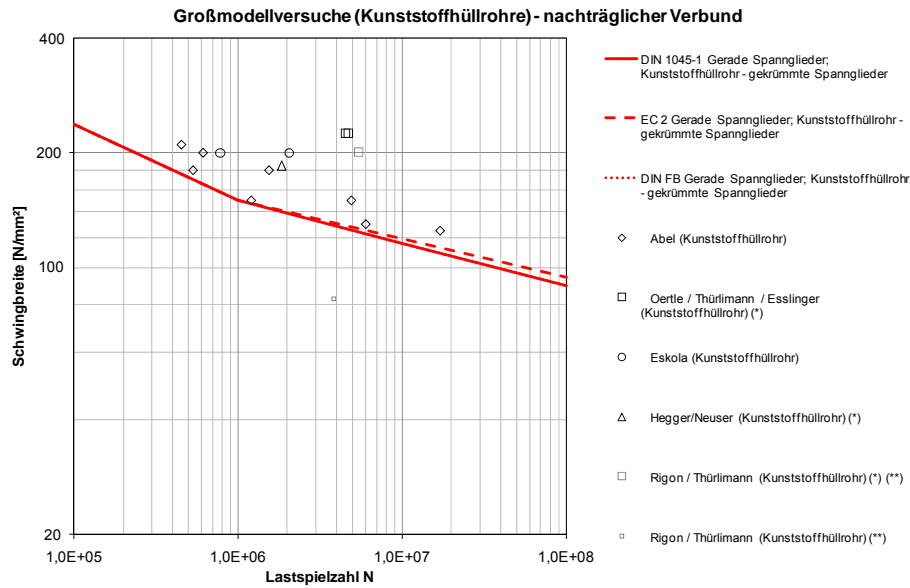
Aus dieser tabellarischen Zusammenstellung lassen sich in Bezug auf die durchgeführten Untersuchungen zur Dauerschwingfestigkeit von Spanngliedern folgende Schlussfolgerungen ziehen:

- Ein nennenswerter Teil der Ergebnisse der durchgeführten Untersuchungen ist infolge der Versuchsdurchführung mit Unsicherheiten behaftet.
- In den Versuchen wurden im Wesentlichen Spannstahllitzen überprüft. Zu Spannstahldrähten liegen vergleichsweise wenige Untersuchungen vor; ebenso zu Bündelspanngliedern.
- Die durchgeführten Untersuchungen konzentrieren sich auf Normalbetone. Höherfeste Betone wurden nur vereinzelt geprüft; oberhalb C70/80 liegen keine Versuche vor.
- Untersuchungen zum Einfluss des Einpressmörtels und der Einpressgüte auf die Dauerschwingfestigkeit liegen nicht vor.
- Das Spannungsniveau in den durchgeführten Versuchen liegt im Bereich von 0,55 bis 0,75 f_{pk} , wobei sich die Mehrzahl der Versuche auf den Bereich 0,55 bis 0,65 f_{pk} konzentrieren (entsprechend der seinerzeit gültigen Normensituation). Untersuchungen mit einem hohen Spannungsniveau ($>0,75 f_{pk}$) sind nicht bekannt.
- Zum Schwingbreitenbereich $<100 \text{ N/mm}^2$ sowie $>300 \text{ N/mm}^2$ liegen für den nachträglichen Verbund keine aussagekräftigen und vergleichbaren Untersuchungen vor.
- Untersuchungsergebnisse zur Dauerschwingfestigkeit von Spanngliedern im sofortigen Verbund sind in der Mehrzahl als unsicher einzustufen.
- Beim sofortigen Verbund fehlen Untersuchungen zum Schwingbreitenbereich $<100 \text{ N/mm}^2$ vollständig.
- Untersuchungen mit Simulation einer feuchten Umgebung liegen bei beiden Verbundarten nur in geringer Anzahl vor. Untersuchungen in denen aggressive Umgebungsbedingungen (z. B. Chloridangriff) simuliert werden sind nicht bekannt.

4 Auswertung und Beurteilung der vorliegenden Versuchsergebnisse hinsichtlich derzeitiger Normung

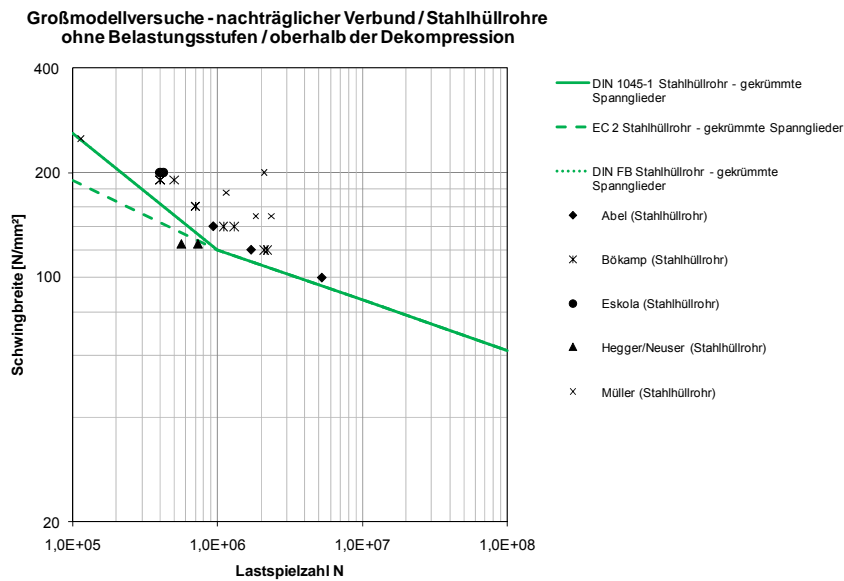
Die Zusammenstellung der verwertbaren Versuchsergebnisse für Vorspannung mit nachträglichem Verbund bei Kunststoffhüllrohren ergeben sich im Einzelnen folgende Ergebnisse:

- Die Wöhlerlinien für gekrümmte Spannglieder in Kunststoffhüllrohren geben für fast alle Versuchsergebnisse ein zutreffendes Schwingbreitenniveau für Spannglieder mit nachträglichem Verbund an; nur ein Versuchsergebnis liegt unterhalb der Normenangaben.
- Der Schwingbreitenbereich $> 200 \text{ MN/m}^2$ bzw. $< 125 \text{ MN/m}^2$ wurde nicht oder nur vereinzelt abgeprüft; ebenso wie der Bereich mit Lastspielzahlen $> 6 \times 10^6$.



Die verwertbaren Versuchsergebnisse für Vorspannung mit nachträglichem Verbund bei Stahlhüllrohren und die Gegenüberstellung mit den entsprechenden Normenangaben lassen sich folgende Aussagen ableiten:

- Die Wöhlerlinien für gekrümmte Spannglieder in Stahlhüllrohren geben für fast alle Versuchsergebnisse ein zutreffendes Schwingbreitenniveau für Spannglieder mit nachträglichem Verbund an; zwei Versuchsergebnisse liegen unterhalb der Normenangaben. Dieses ist auf Knicke im Hüllrohr zurückzuführen, die zu einer lokalen Überbeanspruchung geführt haben.
- Der Schwingbreitenbereich $> 200 \text{ MN/m}^2$ bzw. $< 100 \text{ MN/m}^2$ wurde nicht abgeprüft; ebenso liegen keine Versuchsergebnisse mit Lastspielzahlen $> 7 \times 10^6$ vor.



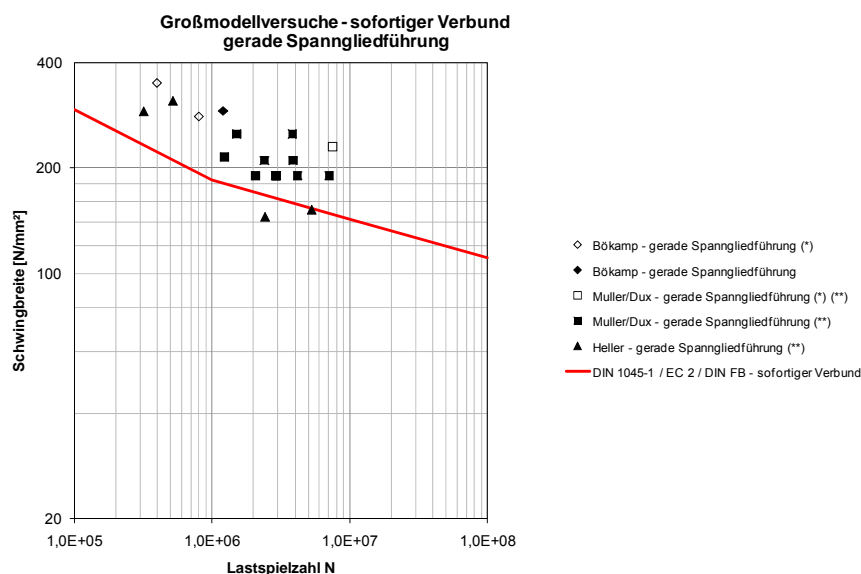
Insgesamt können für Versuche mit nachträglichem Verbund folgende Aussagen gemacht werden:

- Die in den Versuchen verwendeten Betongütern entsprechen üblichen Praxisbedingungen; der Festigkeitsbereich der Normen wurde nicht vollständig abgeprüft. Die Betonfestigkeit dürfte im Zusammenhang mit Spanngliedern mit nachträglichem Verbund aufgrund der Verwendung von Hüllrohren (Stahl- bzw. Kunststoffhüllrohre) eine untergeordnete Rolle spielen.
- Die verwendeten Betonstahl- und Spannstahlgütern entsprechen ebenfalls üblichen Praxisbedingungen und dem Normenumfang. Naturgemäß können nicht alle vom Deutschen Institut für Bautechnik bauaufsichtlich zugelassenen Spannstählen in aufwändigen Bauteilversuchen abgeprüft werden.
- Der nach Meinung der Verfasser für die Baupraxis durchaus interessante Schwingbreitenbereich ($<100 \text{ N/mm}^2$ bzw. $N > 1 \times 10^7$ Lastwechsel) wurde bislang nur unzureichend untersucht. Dieses ist im Wesentlichen auf eine lange Labortestphase zurückzuführen.
- Der Bereich mit Lastspielen $N < 1 \times 10^6$ ist ebenso in geringerem Maße untersucht worden, hat jedoch nach Meinung der Verfasser in baupraktischer Hinsicht eine geringere Bedeutung.

Die Auswertung der Versuchsergebnisse zum **sofortigen Verbund** ist aufgrund der insgesamt sehr wenigen Untersuchungen und der Tatsache, dass in der Mehrzahl der Versuche das Dekompressionsniveau während der dynamischen Belastung durchfahren wurde, schwerer als bei der Vorspannung mit nachträglichem Verbund.

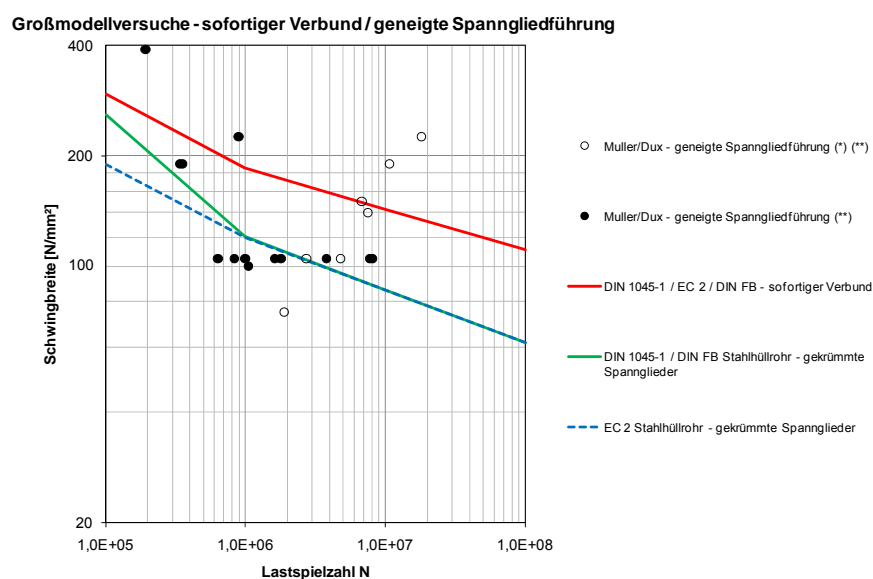
Eine Einordnung der Versuchswerte von Spanngliedern mit sofortigem Verbund und gerader Spanngliedführung in den Normenkontext ergibt folgende Ergebnisse:

- Die Wöhlerlinien für sofortigem Verbund mit geradliniger Spanngliedführung geben für fast alle Versuchsergebnisse ein zutreffendes Schwingbreitenniveau an; zwei Versuchsergebnisse liegen unterhalb der Normenangaben.
- Nur sehr wenige Versuchsergebnisse decken den Schwingbreitenbereich $< 185 \text{ MN/m}^2$ ab, die darüber hinaus auch die Normenangaben nicht erfüllen; ebenso liegen keine Versuchsergebnisse mit Lastspielzahlen $> 8 \times 10^6$ vor.



Eine Einordnung der Versuchswerte von Spanngliedern mit sofortigem Verbund und umgelenkter Spanngliedführung in den Normenkontext lassen sich im Einzelnen folgende Aussagen ableiten:

- Die vorliegenden Versuchswerte können nicht in den Normenkontext eingeordnet werden. Die Ergebnisse weisen eine große Streubreite bei gleichbleibenden Versuchsparametern auf. Die aufgetretenen Spannstaahlbrüche sind größtenteils von den Umlenkstellen ausgegangen.
- Werden die Ansätze der derzeitigen Normen für Spannglieder mit nachträglichem Verbund auf die Versuchsergebnisse der umgelenkten Spannglieder im sofortigen Verbund angesetzt, zeigt sich eine bessere Übereinstimmung, was auf die Berücksichtigung der Reibkorrosion bei nachträglichem Verbund zurückzuführen ist.



Insgesamt können zu den Versuchsergebnissen mit Spanngliedern im sofortigen Verbund folgende Ergänzungen gemacht werden.

- Die in den Versuchen verwendeten Betongüten entsprechen üblichen Praxisbedingungen; der Festigkeitsbereich der Normen wurde nicht vollständig abgeprüft. Die Betongüte dürfte im Zusammenhang mit umgelenkten Spanngliedern mit sofortigem Verbund aufgrund der Verwendung von Umlenkstrukturen eine untergeordnete Rolle spielen. Bei gerader Spanngliedführung weisen einige Versuchsergebnisse der Betongüte einen Einfluss zu; umfassende systematische Untersuchungen hierzu fehlen allerdings.
- Auch unter Berücksichtigung der erwähnten Unsicherheiten (Durchfahren des Dekompressionsniveaus, Ansatz unterschiedlicher Belastungsstufen) hinsichtlich der Güte und der Quantität der Untersuchungsergebnisse wird nach Meinung der Verfasser das Dauerschwingverhalten von geraden Spanngliedern von der derzeitigen Normung gut widergespiegelt.
- Dennoch sollte eine Übertragung der Ergebnisse der Dauerschwingfestigkeitsprüfungen von frei schwingenden Proben auf den eingebauten Zustand von Spannbetonbauteilen durch weitere Versuche abgesichert werden.

5 Zusammenfassung

Der vorliegende Bericht gibt einen Sachstand zur Dauerschwingfestigkeit von Spanngliedern unter dynamischer Beanspruchung im eingebauten Zustand, wobei auch Spannglieder im sofortigen Verbund betrachtet wurden. Die externe Vorspannung oder Spannglieder ohne Verbund wurden in den Untersuchungen nicht berücksichtigt. Ebenso erfolgte keine Untersuchung von Ermüdungserscheinungen von Koppel- oder Ankerstellen sowie der Verankerungsbereiche bei Vorspannung mit sofortigem Verbund.

In einer Datenbank wurden die Versuchsparameter in tabellarischer Form zusammengestellt. Außerdem wurde eine Bewertung der vorliegenden Versuchsergebnisse hinsichtlich ihrer Aussagefähigkeit (Verwertbarkeit) und der Einordnung in den Anwendungsbereich der nationalen Normung (DIN 1045-1) vorgenommen.

Der Bereich der nachträglichen Vorspannung wurde insgesamt umfangreich experimentell untersucht, wobei durchaus noch Kenntnislücken im Hinblick auf hohe Vorspannwerte ($>0,75 f_{pk}$), hohe Betonfestigkeitsklassen ($>C70$), Schwingbreiten $\Delta\sigma < 100 \text{ N/mm}^2$, hohe Lastspielzahlen ($N > 10^7$) und Untersuchungen im Zeitfestigkeitsbereich ($\Delta\sigma > 250 \text{ N/mm}^2$) bestehen. Zur Vorspannung mit sofortigem Verbund mit geraden Spanngliedern liegen nur sehr wenige Versuche vor, die nur einzelne Schwingbreitenbereiche abdecken. Quantifizierbare Untersuchungen zu umgelenkten Spanngliedern mit sofortigem Verbund konnten im Rahmen dieses Vorhabens im europäischen Raum nicht gefunden werden, so dass hierzu noch Forschungsbedarf existiert. Die vorliegenden internationalen Untersuchungen zu umgelenkten Spanngliedern weisen auf eine erhebliche Reduzierung der Dauerschwingfestigkeit unter dynamischer Beanspruchung hin. Des Weiteren muss beachtet werden, dass ein Großteil der vorliegenden Untersuchungen mit sofortigem Verbund unter Beanspruchungsbedingungen durchgeführt wurden, bei denen das Dekompressionsniveau während der Versuche durchfahren wurde oder mehrere Belastungsstufen bzw. Schwingbreiten nacheinander auf einen Prüfkörper aufgebracht wurden. Durch diese einzelnen Belastungsstufen entstehen jeweils Mikroschädigungen im Spannstahl, so dass die Gesamtschädigung abschließend nicht einer Schwingbreite zugeordnet werden kann.

Die verwertbaren Versuchsergebnisse wurden den Wöhlerlinien für Spannglieder der DIN 1045-1, des EC 2 und des FB 102 gegenübergestellt und lassen insgesamt den Schluss zu, dass die Dauerschwingfestigkeit von Spanngliedern mit nachträglichem Verbund – unter Berücksichtigung der oben erwähnten Kenntnislücken – gut von den betreffenden Normen abgebildet wird. Die Untersuchungen zum sofortigen Verbund lassen sich für die geradlinige Spanngliedführung gut mit den Normenangaben beschreiben; für eine geneigte bzw. umgelenkte Spanngliedführung kann keine konkrete Bemessungsempfehlung angegeben werden, da sehr wenige und unzureichende Untersuchungen vorliegen. In den nationalen Regelwerken sollte die angegebenen Wöhlerlinien für sofortigen Verbund hinsichtlich einer umgelenkten Spanngliedführung eingeschränkt werden.

Schließlich erfolgte eine kurze Bewertung der bisherigen Versuchskonfigurationen hinsichtlich der baupraktischen Einbau- und Anwendungssituationen. Eine Übertragbarkeit der Dauerschwingfestigkeit von frei schwingend geprüften Proben auf eingebaute Spannglieder ist nicht möglich, da die Einflüsse aus Reibkorrosion zu einer verminderten Dauerschwingfestigkeit führen. Kleinbauteilversuche mit Berücksichtigung der Reibkorrosion zeigen eine bessere Übereinstimmung mit durchgeführten Großbauteilversuchen, sie können jedoch das reale Bauteilverhalten aufgrund einer fehlenden Abbildung einzelner Versuchsparameter, z. B. Biegung in den Spanngliedern, nicht exakt wiedergeben.

6 Literatur

- [1] Abel, M.: Zur Dauerhaftigkeit von Spanngliedern in teilweise vorgespannten Bauteilen unter Betriebsbedingungen, RWTH Aachen, Institut für Massivbau, Dissertation 1996
- [2] Abeles, P. W., Brown II, E. I., Hu, C. H.: Behavior Of Under-Reinforced Prestressed Concrete Beams Subjected To Different Stress Ranges SP 41-12. Abeles Symposium – Fatigue Of Concrete, ACI-Publication SP-41, 1974, S. 279-300
- [3] Abeles, P. W., Brown II, E. I., Hu, C. H.: Fatigue Resistance Of Underreinforced Prestressed Beams Subjected To Different Stress Ranges; Miner’s Hypothesis SP-41-11. Abeles Symposium – Fatigue Of Concrete, ACI-Publication SP-41, 1974, S. 237-277
- [4] Abeles, P. W., Brown, E. J., Hu, C. H.: Fatigue resistance of underreinforced prestressed beams subjected to different stress ranges; Miner’s hypothesis, ACI-Publication, Sp 41-11, 1974, S. 237-277
- [5] Bökamp, H.: Ein Beitrag zur Spannstahlermüdung unter Reibdauerbeanspruchung bei teilweiser Vorspannung, RWTH Aachen, Institut für Massivbau, Dissertation 1991
- [6] Cordes, H., Lapp-Emden, M.: Untersuchungen zur Dauerfestigkeit von Spanngliedern für die besonderen Bedingungen der teilweisen Vorspannung, Bericht Nr. 18/84 des Instituts für Massivbau, RWTH Aachen, Juni 1984
- [7] Cordes, H., Lapp-Emden, M.: Untersuchungen zur Dauerschwingfestigkeit von Spanngliedern für die besonderen Bedingungen der teilweisen Vorspannung. Kurzbericht aus der Bau-forschung Nr. 12/84-185, S. 989-991
- [8] Deutsches Institut für Normung e.V. - DIN: DIN 1045-1 - Teil 1 - Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton, Teil 1: Bemessung und Konstruktion (2008).
- [9] Eskola, L.: Zur Ermüdung teilweise vorgespannter Betontragwerke, Institut für Baustatik und Konstruktion, ETH Zürich, Dissertation 1996
- [10] Hegger, J., Neuser, J.: Untersuchungen zur Reibermüdung von großen Spanngliedern bei teilweise vorgespannten Bauteilen unter Betriebsbedingungen, Schlußbericht, Institutsbericht Nr.: 49/98, Lehrstuhl und Institut für Massivbau, RWTH Aachen, 1998
- [11] Heller, B. E.: Fatigue of Pretensioned Concrete Beams, The University of Texas at Austin, Master Thesis, 2003
- [12] Koch, R.: Dauerschwingversuch an einem teilweise vorgespannten Spannbetonträger. Otto-Graf-Institut, Forschungs- und Materialprüfanstalt Baden-Württemberg, Schriftenreihe Heft 80, 1988
- [13] Müller, H. H.: Abschlußbericht zum Forschungsvorhaben „Prüfverfahren für die Dauerschwingfestigkeit von Spannstählen“, Institut für Bauingenieurwesen III, Technische Universität München, Nr. 1111, Mai 1985
- [14] Müller, H. H.: Spannglieder in Kunststoffhüllrohren. Schlußbericht zum Forschungsvorhaben IfBt. IV 1-5-474/86, Lehrstuhl für Massivbau der TU München, 1994
- [15] Muller, J. F., Dux, P. F.: Fatigue of Prestressed Concrete Beams with Inclined Strands, University of Queensland, Department of Civil Engineering, Research Report No. CE 135, 1992
- [16] Muller, J. F., Dux, P. F.: Fatigue of Prestressed Concrete Beams with Inclined Strands, Journal of Structural Engineering, Vol. 120, No. 4, 1994
- [17] Oertle, J.: Reibermüdung einbetonierter Spannkabel, Institut für Baustatik und Konstruktion, ETH Zürich, Bericht Nr. 166, September 1988
- [18] Rigon, C., Thürlimann, B.: Fatigue Tests on Post-Tensioned Concrete Beams, Institut für Bautechnik und Konstruktion, ETH Zürich, Bericht Nr. 8101-1, August 1985
- [19] Voß, K.-U.: Zum Trag- und Verformungsverhalten von Spannbetonträgern im Zustand II – Unterschiedliches Verbundverhalten bei Schwellbeanspruchung, Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, ibMB der Technischen Universität Braunschweig, Heft 111, 1993