

Abschlussbericht

- Zusammenfassung -

(DIBt (P 32-5-7.217-1053/03))

Institutsbericht-Nr. 122/2005

des Instituts für Massivbau der RWTH Aachen

Gegenstand: „Verbundverankerungen von Spannstählen sowie Querkrafttragfähigkeit bei Spannbetonfertigteilen aus selbstverdichtendem Beton“

Auftraggeber: Deutsches Institut für Bautechnik
DIBt (Az.: P 32-5-7.217-1053/03)

erstattet von: Prof. Dr.-Ing. Josef Hegger
Dr.-Ing. Norbert Will
Dipl.-Ing. Boris Kommer

Datum: Aachen, den 16.01.2007

Projekt-Nr. IMB: F-2002-002

Diese Zusammenfassung umfasst 8 Seiten.

1 Einleitung

Die Verwendung von selbstverdichtendem Beton (SVB) für Spannbetonfertigteile stellt unter wirtschaftlichen, technischen und ästhetischen Gesichtspunkten eine Weiterentwicklung der Betonbauweise dar. Auf Grund seines höheren Mehlkorngehalts und seiner Viskosität verfügt SVB über eine andere Mikrostruktur als Normalbeton, was die Kontaktzone zwischen Matrix und Litzen beeinflusst. Während der Elastizitätsmodul von SVB kleiner ist als der von Normalbeton, ist die Zugfestigkeit größer. Der hohe Mehlkorngehalt beeinflusst darüber hinaus das Querkrafttragverhalten. Die günstige Wirkung der Rissverzahnung nach Schubrissbildung, die eine Kraftübertragung über die Rissufer hinweg ermöglicht, ist bei selbstverdichtendem Beton nicht so stark ausgeprägt.

Das Verbundverhalten von Spannstählen, insbesondere Litzen, in SVB wird daher in der aktuellen Literatur kontrovers diskutiert und die Bemessungsregeln für die Verbundfestigkeit von herkömmlichem Beton können nicht direkt für SVB übernommen werden. Auch bei der Querkraftbemessung stellt sich die Frage, ob die für Normalbeton gültigen Ansätze anwendbar sind.

Zur Klärung der offenen Fragestellungen wurden neben theoretischen Untersuchungen 144 Ausziehversuche an Betonwürfeln, 5 Spannkrafteinleitungsversuche sowie 4 Balkenversuche zur Verbundverankerung und 4 Querkraftversuche durchgeführt. Die Untersuchungen, die sich auf drei Betone konzentrierten (Mehlkornotyp mit Flugasche, Mehlkornotyp mit Kalksteinmehl, Kombinationstyp mit Stabilisator und Flugasche), und deren wesentliche Ergebnisse werden im Folgenden erläutert.

2 Verbund von Vorspannlitzen

Die Kraftübertragung zwischen Stahl und Beton wird durch die drei grundlegenden Mechanismen Haftung, Scherwiderstand sowie Reibung beschrieben. Die drei für Betonstahl beschriebenen Verbundmechanismen können grundsätzlich auch auf Litzen übertragen werden, wobei angenommen wird, dass die Kraftübertragung vorrangig durch den Reibungs- und Haftverbund erfolgt.

Hoyer [1] fand heraus, dass zwischen vorgespanntem Stahl und umhüllendem Beton ein Querdruck erzeugt wird. Aus der Längsdehnung einer Litze beim Vorspannen resultiert eine Abnahme des Durchmessers. Bei der Spannkrafteinleitung dehnt sich die Litze wieder in Querrichtung aus. Da der erhärtete Beton dieser Ausdehnung entgegenwirkt, entstehen Querspannungen in der Kontaktfläche. Weitere Untersuchungen zur Verbundverankerung von Litzen, z.B. [2][3] sowie eigene Arbeiten ergaben, dass sich die Verbundfestigkeit von vorgespannten Litzen aus drei Hauptanteilen zusammensetzt,

- einem konstanten Anteil,
- einem spannungsabhängigen Anteil und
- einem schlupfabhängigen Anteil.

Der konstante Anteil des Verbunds besteht im wesentlichen aus Haft- und Reibungsverbund. Der spannungsabhängige Anteil resultiert aus einer zusätzlichen Reibung infolge des Quer-

drucks zwischen Stahl und Beton (Hoyer-Effekt). Wegen der speziellen Schraubengeometrie der Litzen und der Verzahnungswirkung hängt der Verbundwiderstand auch vom Schlupf ab (schlupfabhängiger Anteil). Da sich der Querdruck und die Relativverschiebung über die Länge der Spannkrafteinleitung verringern, ist die Verbundspannung nicht konstant. Die Einleitung der Vorspannung einer Litze in den Beton zeigt Abbildung 1.

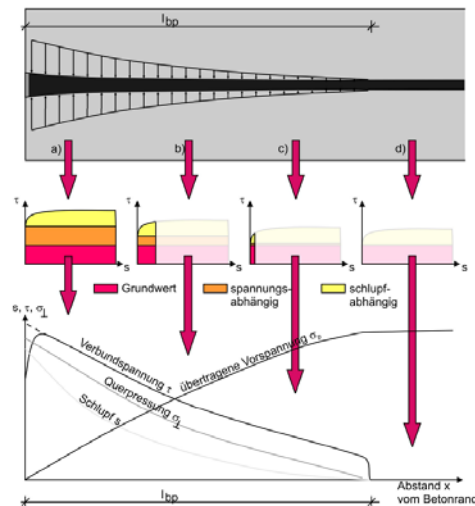


Abbildung 1: Verbundverankerung von Litzen

Am Anfang der Übertragungslänge wird fast die gesamte Vorspannung übertragen, zwischen Stahl und Beton entsteht ein hoher Querdruck, um ein Gleichgewicht zu schaffen. Neben dem konstanten Anteil sind auch die spannungs- und schlupfabhängigen Anteile vollständig aktiviert (Bereich a). Die Vorspannung des Betons wird über die Übertragungslänge größer und die zu übertragende Spannung sinkt (Bereich b). Daher sind Schlupf und Querdruck zwischen Stahl und Beton im Vergleich zum Beginn der Übertragungslänge (Bereich c) geringer. Am Ende der Übertragungslänge wird vom Stahl nur eine geringe Spannung auf den Beton übertragen. In diesem Bereich sind Schlupf und Querdruck sehr niedrig. Es ist fast nur der konstante Anteil aktiviert. Außerhalb der Übertragungslänge (Bereich d) sind Stahl und Beton ohne Spannungsübertragung im Gleichgewicht. Des Weiteren kommt es außerhalb der Übertragungslänge wegen der Vorspannung des Betons weder zu Verbundspannung noch zu Querdruck oder Schlupf.

3 Durchgeführte Untersuchungen

3.1 Ausziehversuche

Versuchsdurchführung

Zur Untersuchung der Verbundfestigkeit entlang der Übertragungslänge wurden Ausziehversuche mit kurzer Verankerungslänge durchgeführt. Allerdings ist es mit diesen Versuchen nicht möglich, den Einfluss des Hoyer-Effektes zu bestimmen. Deshalb wurde die Versuchsdurchführung modifiziert. Zum Einen wurden push-pullout-tests durchgeführt. Durch die Anordnung der Versuchskörper ungefähr in der Mitte zwischen den Verankerungen der vorgespannten Litzen wurde die Ausziehungskraft etwa je zur Hälfte in die vor und hinter dem Versuchskörper liegenden Abschnitte der Litzen geleitet. Damit lassen sich die ungewollten

spannungsabhängigen Änderungen der Querpressungen, die beim einseitigen Ziehen entstehen, weitestgehend ausgleichen. Zum Anderen wurde die Spannkraft der einbetonierten Litzen unmittelbar vor dem eigentlichen Ausziehversuch in drei Schritten abgelassen.

Die Versuchskörper wurden mit einer Spannung von 1.350 N/mm^2 vorgespannt. Die ersten Versuchskörper wurden ohne Ablassen der Vorspannung getestet. Diese Versuchskörper repräsentieren die Verbundfestigkeit am Ende der Übertragungslänge. Danach wurde die Verbund-Schlupf-Beziehung nach Ablassen von etwa der Hälfte der Vorspannung (650 N/mm^2) ermittelt. Die Versuche an den Versuchskörpern nach fast vollständigem Ablassen der Vorspannung beschreiben das Verbundverhalten am Anfang der Übertragungslänge (1.200 N/mm^2). Eine verbleibende Restspannung (150 N/mm^2) sollte eine Verwindung der Litzen verhindern.

Es wurden drei SVB-Typen verwendet, um den Einfluss verschiedener Betonmischungen zu bestimmen [4]. Wegen des erwarteten Einflusses des Mehlkorngeltes auf das Verbundverhalten, wurden die Versuchskörper aus zwei unterschiedlichen Mehlkorntypen-SVB hergestellt, einer mit Flugasche (PT/FA) und einer mit Kalksteinmehl (PT/LS) sowie ein Kombinationstyp-SVB (CT/FA) mit Flugasche und einem Stabilisator (VMA). In den Versuchen wurden 7-drähtige Litzen ($d_p = 12,5 \text{ mm}$, $A_p = 0,935 \text{ cm}^2$) bzw. gerippter Spanndraht ($\varnothing 12 \text{ mm}$) verwendet.

Versuchsergebnisse und Diskussion

Trotz des hohen Mehlkorngeltes von SVB entspricht das Verbundverhalten der vorgespannten Litze mit sofortigem Verbund im Wesentlichen dem Verbundverhalten in herkömmlichem Beton mit seinen drei – zuvor erläuterten – Anteilen. Um das Verbundverhalten und seine Einflussfaktoren zu diskutieren, wird die Verbundfestigkeit f_{bp} abhängig von der Ausziehungskraft F berechnet:

$$f_{bp} = \frac{F}{\pi \cdot d_p \cdot l} \quad (\text{Gl. 1})$$

d_p ist der Nenndurchmesser der Litze und die Verbundlänge l beträgt hier etwa 50 mm .

Die Haupteinflussfaktoren sind:

- Vorspannung – In Abbildung 2 werden die Ergebnisse der Ausziehversuche mit (rote Linien) und ohne (blaue Linien) Einleitung der Vorspannung gegenübergestellt. Vergleichbar mit herkömmlichem Beton (Normalbeton und hochfester Beton), verdoppelt der Querdruck in der Kontaktzone zwischen Stahl und Beton bei der Einleitung von ca. 1.200 N/mm^2 nahezu die Verbundfestigkeit unabhängig vom SVB-Typ.

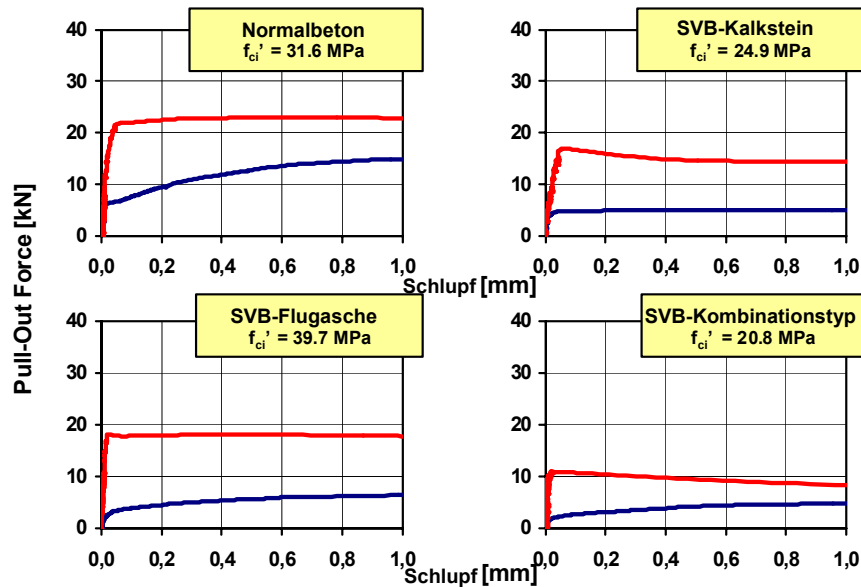


Abbildung 2: Experimentelle Ausziehungskräfte von Litzen

- Druckfestigkeit – Es ist allgemein bekannt, dass die Verbundfestigkeit f_{bp} mit zunehmender Betonfestigkeit f_{ci}' steigt. Für jede Betonzusammensetzung variiert die auf die Betonfestigkeit bezogene Verbundfestigkeit, die sogenannte spezifische Verbundfestigkeit, nur geringfügig (Abbildung 2).
- Betonzusammensetzung – Das Verbundverhalten und die Verbundfestigkeit hängen von der Betonzusammensetzung ab. Abbildung 3 zeigt die bezogenen Verbundfestigkeiten verschiedener SVB-Typen sowie Normalbetons mit und ohne Einleitung der Vorspannung. Während ein SVB mit Kalksteinmehl die Verbundfestigkeit von Normalbeton erreicht, ist die Verbundfestigkeit von SVB mit Flugasche kleiner. Das gilt sowohl für den Mehlkorntyp als auch für den Kombinationstyp.

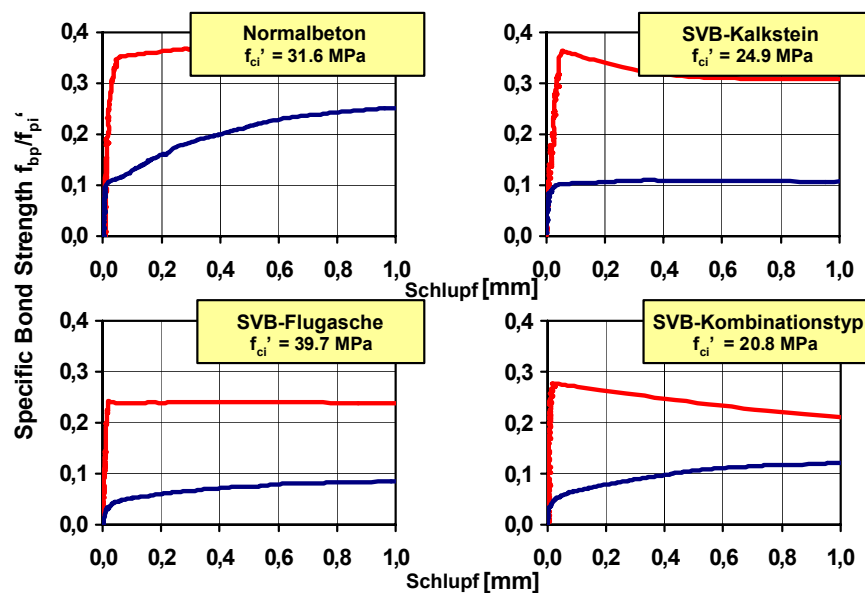


Abbildung 3: Ermittelte bezogene Verbundfestigkeiten von Litzen

- **Betonalter** – Mit dem Betonalter nimmt die Betondruckfestigkeit und somit auch die Verbundfestigkeit zu. Aus den Ausziehversuchen lässt sich ableiten, dass die bezogene Verbundfestigkeit praktisch unabhängig vom Betonalter ist.

Eine Betondeckung von $c = 5,5 \cdot d_p$ zeigt ohne vorherige Änderung der Litzenkraft gegenüber geringeren Betondeckungen ($c = 2 \cdot d_p$ bzw. $c = 3 \cdot d_p$) keinen signifikanten Einfluss auf die Verbundkraft. Nach Änderung der Litzenkraft hingegen sind in fast allen Fällen bei einer Betondeckung von $c = 3,0 \cdot d_p$ teilweise größere Verbundkräfte als bei einer Betondeckung von $c = 5,5 \cdot d_p$ ermittelt worden. Dies deckt sich mit den Ergebnissen für Normalbeton und hochfesten Leichtbeton [4]. Bei den gerippten Spanndrähten ist eine Betondeckung von $c = 5,75 \cdot d_p$ für die untersuchten SVB-Mischungen zur Verhinderung einer Sprenggrissbildung ausreichend.

Analytischer Ansatz

Aus den Ausziehversuchen wurde in Anlehnung an hochfesten Beton [5] eine Verbund-Schlupf-Beziehung abgeleitet. Diese besteht aus den drei Verbundanteilen gemäß Kapitel 2.

$$\tau_b(x) = 0,06 \cdot f_{ci}' + 1,08 \cdot 10^{-4} \cdot f_{ci}' \cdot \sigma_p(x) + 0,01 \cdot f_{ci}'^{1,7} \cdot s(x)^{0,08} \quad (\text{Gl. 2})$$

Die Verbundspannung τ_b (in Bezug auf den Umfang) hängt von der Druckfestigkeit f_{ci}' zum Zeitpunkt des Ablassens, der Vorspannung $\sigma_p(x)$ und dem Schlupf $s(x)$ ab. Während die Vorspannung kontinuierlich eingeleitet wird, variieren der Schlupf und die zu übertragene Vorspannung entlang der Übertragungslänge. Deshalb wird die Verbund-Schlupf-Beziehung mit der folgenden Differenzialgleichung beschrieben, deren Grundform für Bewehrungsstahl abgeleitet wurde [6]:

$$\frac{d^2 s_p}{dx^2} = \frac{1}{E_p} \cdot \left(\frac{d\sigma_p(x)}{dx} - \alpha_p \frac{d\sigma_c(x)}{dx} \right) \quad \text{wobei} \quad \alpha_p = \frac{E_p}{E_c} \quad (\text{Gl. 3})$$

3.2 Spannkrafteinleitungsversuche

Die Spannkrafteinleitungsversuche wurden auf Basis der Ergebnisse der Ausziehversuche entwickelt [4]. Die Versuchskörper mit einer Gesamtlänge von 2,0 m beschreiben den Verankerungsbereich vorgespannter Träger. Sie haben einen rechteckigen Querschnitt mit zwei oder vier 7-drähtigen Litzen bzw. gerippten Spanndrähten, die symmetrisch angeordnet sind. Auf der Betonoberfläche wurden Setzdehnungsmessmarken angebracht, um die Betondehnung zu messen. Die Vorspannung wurde gemäß DIN 1045-1 [7] auf $f_{pi} = 1.275 \text{ N/mm}^2$ festgelegt und schrittweise eingeleitet. Litzen, Spanndrähte und Betonmischung entsprachen denen der Ausziehversuche.

Bei den untersuchten SVB-Typen ist eine Betondeckung von $c \geq 2,5 \cdot d_p$ und ein lichter Litzenabstand $s \geq 2,0 \cdot d_p$ erforderlich, um eine rissfreie Einleitung der Vorspannkraft der 0,5“-Litzen nach DIN 1045-1 sicherzustellen. Für gerippte Spanndrähte sind die Werte in Anlehnung an die Regelungen für Normalbeton nochmals um $0,5 \cdot d_p$ zu erhöhen. Zwischen der Betondruckfestigkeit zum Zeitpunkt der Spannkrafteinleitung und der Übertragungslänge besteht für die hier untersuchten SVB-Mischungen ein nahezu linearer Zusammenhang. Nach der Spannkrafteinleitung waren keine signifikanten zeitabhängigen

Verschiebungszuwächse der Litzen infolge des Verbundkriechens festzustellen, allerdings nahmen die Betondehnungen infolge Kriechen zu. Eine nennenswerte Zunahme der Übertragungslänge wurde demnach nicht festgestellt.

Analytischer Ansatz

Für Litzen kann die Übertragungslänge mit der Differentialgleichung aus Gl. 3 unter Verwendung der Verbund-Schlupf-Beziehung aus Gl. 2 sehr gut vorausberechnet werden (Abbildung 4). Für die Praxis kann Gl. 2 durch eine mittlere Verbundfestigkeit $f_{bp,m}$ entlang der Übertragungslänge ersetzt werden. Ausgehend von dem Grenzquantil führt dies zu folgendem Bemessungsansatz für die Übertragungslänge l_t , auf Grundlage von Model Code 90 [8]:

$$l_t = \frac{A_p \cdot f_{pi}}{d_p \cdot \pi \cdot f_{bp,m}} \quad \text{wobei } f_{bp,m} = 0,15 \cdot f_{ci}' \quad (\text{Gl. 4})$$

wobei:

- $f_{bp,m}$ mittlere Verbundfestigkeit
- f_{pi} Vorspannung nach Spannkrafteinleitung
- d_p Nenndurchmesser
- A_p Querschnitt des Spannglieds
- f_{ci}' Druckfestigkeit zum Zeitpunkt der Spannkrafteinleitung

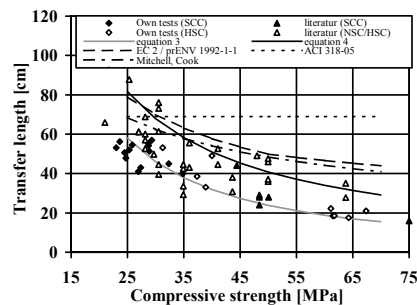


Abbildung 4: Vergleich der anhand der Übertragungslänge berechneten mittleren bezogenen Verbundfestigkeit mit den normativen Regelungen

Abhängig von der Bemessungssituation muss der Wert aus Gl. 4 mit dem Faktor 1,2 bzw. 0,8 (je nachdem, welcher ungünstiger ist) korrigiert werden. Obwohl die Übertragungslänge nach Gl. 4 ursprünglich für die Übertragungslänge in Normalbeton und hochfestem Beton abgeleitet wurde, erlaubt die Gleichung auch eine sichere Vorhersage der Übertragungslängen aller verwendeten SVB-Typen (Abbildung 4). Des Weiteren werden die Bemessungswerte anderer Konzepte [9][10][11], die ausführlich in [12] diskutiert werden, mit den Versuchsdaten eigener Versuche sowie Ergebnissen aus der Literatur verglichen. Es ist offensichtlich, dass diese Konzepte auch zu einer zuverlässigen Bemessung der Verankerungszone im SVB führen.

3.3 Balkenversuche

In dieser Versuchsreihe wurden vier mittels Litzen bzw. geripptem Spanndraht vorgespannte Balken (T-Querschnitt) im Vier-Punktbiegeversuch untersucht, wobei die Vorspannung in zehn Stufen abgelassen wurde. Zusätzlich zum Einfluss der Betonzusammensetzung wurde der Einfluss einer Querbewehrung ermittelt, indem an einem Balkenende keine Bügel ange-

ordnet wurden. Die Betondeckung und der lichte Abstand der vier Spannstähle in einer Lage entsprechen den Mindestmaßen zur rissfreien Spannkrafteinleitung aus den Spannkrafteinleitungsversuchen.

Eine unkontrollierte Sprenggrissbildung im Einleitungsbereich ist mit den aus den Spannkrafteinleitungsversuchen ermittelten Mindestabmessungen nicht in jedem Fall ausgeschlossen, insbesondere bei mehreren Spannstählen in einer Lage und bei geringer bzw. ohne Bügelbewehrung. Bei Spanndrähten liegen gegenüber Litzen aufgrund der größeren Verbundspannungen auch größere rissauslösende Beanspruchungen des Betons im Einleitungsbereich vor, die zu Sprenggrissen führen können. Eine ausreichende Verbügelung des Spannkrafteinleitungsbereichs verhindert das unkontrollierte Wachstum der Sprengrisse bis zur Oberfläche und es können wesentlich größere Verbundkräfte als bei identischer Betondeckung ohne Querbewehrung übertragen werden.

Bei der Verwendung von gerippten Spanndrähten trat infolge der Biegebeanspruchung ein schlagartiges Verankerungsversagen mit Abplatzen der Betondeckung auf, wohingegen es bei den mit Litzen vorgespannten Balken zu einem Verankerungsversagen infolge des Litzeineinzugs kam. Alle Balken erreichten die rechnerischen Bruchmomente nach DIN 1045-1.

3.4 Querkraftversuche

Durch Querkraftversuche an profilierten Balken mit Litzenvorspannung und geringen bis mittleren Schubbewehrungsgraden wurde die Übertragbarkeit der für Rüttelbeton bekannten Bemessungsregeln auf Spannbetonbauteile aus selbstverdichtenden Beton überprüft. Mit dem SVB-Kombinationstyp und dem SVB mit Kalksteinmehl wurden zwei Betonzusammensetzungen untersucht. Der Versuchsaufbau und -ablauf ist in Abbildung 5 dargestellt.

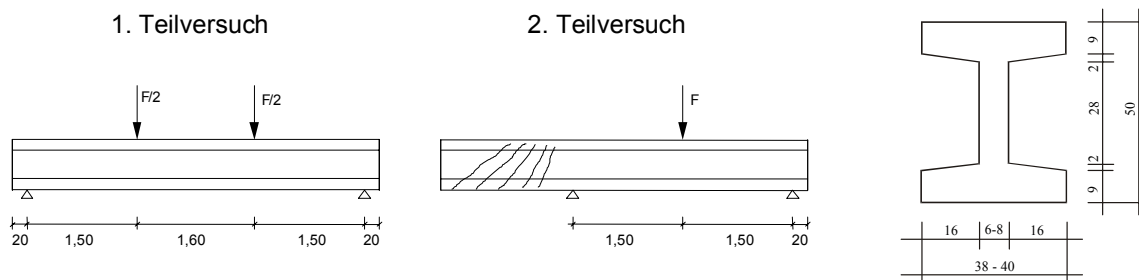


Abbildung 5: Versuchsaufbau und -ablauf der Querkraftversuche

Durch Staffelung der Querkraftbewehrung wurde im ersten Teilversuch zunächst eine Trägerhälfte bis zum Bruch belastet bevor die zweite Trägerhälfte im zweiten Teilversuch getestet wurde.

Während der Spannkrafteinleitung ergaben sich Eintragungslängen von 40 cm bzw. 60 cm, die unterhalb der Eintragungslänge nach DIN 1045-1 und im Bereich der Eintragungslänge von normalfestem Rüttelbeton liegen.

Bei der Schubrissbildung infolge der Querkraftbeanspruchung tritt ein schlagartiger Umlagerungsprozess auf, bei dem die freigesetzten Betonzugkräfte auf die Bügelbewehrung übertragen werden. Aufgrund der im Vergleich zu Normalbeton höheren Zugfestigkeit des selbst-

verdichtenden Betons verläuft dieser Prozess schlagartiger. Insgesamt sind alle Rissverläufe sehr geradlinig. Trotz klaffender Risse nach der Erstrissbildung konnte die Querkraft weiter gesteigert werden, bis der Riss in den Obergurt eindrang und die Druckzone zunehmend eingeschnürt wurde.

Bei Bauteilen mit geringen Bügelbewehrungsgraden ist die Umlagerung in ein inneres Sekundärsystem möglich, das sich aus der Tragwirkung des idealisierten Fachwerkmodells und einem Resttraganteil (Sprengwerkwirkung, Abtrag über die Druckzone) zusammensetzt. Mit zunehmendem Bügelbewehrungsgrad nimmt der Resttraganteil ab. Die hier durchgeführten Versuche an Trägern aus SVB mit geringem Schubbewehrungsgrad liegen - entsprechend den Versuchen an Rüttelbeton - gegenüber dem Bemessungsansatz nach DIN 1045-1 bzw. Görtz [13] auf der sicheren, für die hochschubbewehrten Spannbetonbauteile aus SVB jedoch auf der unsicheren Seite.

4 Literaturverzeichnis

- [1] Hoyer, E.: Der Stahlsaitenbeton. Otto Elsner Verlagsgesellschaft, 1939
- [2] Den Uijl, J. A.: Bond and splitting action of prestressing strand, Bond in Concrete International Conference, Riga, Oktober 1992
- [3] Stocker, M.F.; Sozen, M.A.: Bond characteristics of prestressed strand, Investigations of prestressed reinforced concrete of Highway bridges, University of Illinois, Structural Research, Series No. 344, 1969
- [4] Kommer, B.: Zum Verbundverhalten von Litzen mit sofortigem Verbund in Hochleistungsbetonen. Dissertation in Vorbereitung, Institut für Massivbau, RWTH Aachen
- [5] Nitsch, A.: Spannbettfertigteile aus hochfestem Beton unter Berücksichtigung der teilweisen Vorspannung. Dissertation, Institut für Massivbau, RWTH Aachen, 2001
- [6] Rehm, G.: Über die Grundlagen des Verbundes zwischen Stahl und Beton. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 138, 1969
- [7] DIN 1045-1: Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton – Teil 1: Bemessung und Konstruktion. Juli 2001
- [8] CEB-FIB Model Code 1990. Design Code. Bulletin d'Information No. 213/214, Lausanne, 1991
- [9] ENV 1992-1: Design of concrete structures- Part 1. Überarbeitete Fassung, April 2003
- [10] ACI 318-05: Building Code Requirements for Structural Concrete. American Concrete Institute, Detroit, 2005
- [11] Mitchell, D.; Cook, W.; Khan, A.; Tham, T.: "Influence of High Strength Concrete on Transfer and Development Length of Pretensioning Strand". PCI Journal, Vol. 38, 1993, pp. 52–66
- [12] Hegger, J.; Kommer, B.; Bülte, S.; Sherif, A.: Bond anchorage of pretensioned tendons in high performance concrete (HPC). 7th International Symposium on High Strength/High Performance Concrete, Washington D. C., SP 228, Juni 20–24, 2005
- [13] Görtz, S.: Schubrissverhalten von Stahlbeton- und Spannbetonbauteilen aus Normal- und aus Hochleistungsbeton. Dissertation, Institut für Massivbau, RWTH Aachen, 2004