

DI Bernhard Stebernjak

Dünnwandige Schleuderbetonstäbe – ein viel versprechendes Leichtbauelement



Abb. 1: Bogenbrücke mit Schleuderbetonstäben

Alle Fotos: DI Stebernjak

1 Einleitung

In einem gemeinsamen Forschungs- und Entwicklungsprojekt mit der Fa. MABA Fertigteilindustrie GmbH werden dünnwandige Schleuderbetonstäbe entwickelt, die mittels Knotenelementen zu einer stabwerksförmigen Tragstruktur verbunden werden können. Als Stabwerke sind ebene und räumliche Fachwerke sowie polygonale Näherungen von Bogenkonstruktionen möglich. Aufgrund der geringen Wandstärke von wenigen Zentimetern ist der Einsatz von alternativen Bewehrungsmaterialien wie z. B. Kohlenstofffasern erforderlich, um einerseits eine hohe Tragfähigkeit und andererseits eine Korrosionsunempfindlichkeit zu erreichen. Eine zusätzliche Vorspannung der Stäbe soll unter anderem eine höhere Stabschlankheit ermöglichen.

Es wird zwischen 2 verschiedenen Bauweisen unterschieden:

- generelle Leichtbauweise
- Leichtbauweise für die Bauzustände und Massivbauweise für den Endzustand (= Mischbauweise)

In dieser Mischbauweise werden die Fertigteile nach der Montage nachträglich auf der Baustelle ausbetoniert, um so gemeinsam die Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit im Endzustand sicherzustellen.

Daraus lassen sich für den Brücken- und Hochbau modifizierte Bauweisen entwickeln. Zum Beispiel ein modifizierter Freivorbau von Bogenbrücken, in denen der Bogen aus polygonal angeordneten Schleuderbetonstäben angenähert wird (Abb. 1). Oder hohe Mastsysteme, die als aufgelöste Tragstruktur ausgeführt werden können.

2 Dünnwandige Schleuderbetonstäbe

Die dünnwandigen Schleuderbetonstäbe werden in zwei grundsätzliche Typen eingeteilt, welche sich jeweils sowohl als eigenständiges Leichtbauelement als auch für die Mischbauweise eignen:

Extrem dünnwandiger Stab (ED-Stab)

Der ED-Stab hat eine planmäßige Wandstärke von 1–1,5 cm, wobei als Längs- und Querbewehrung ein Schlauch aus CFK dient. In Abb. 2 ist beispielhaft ein ED-Stab mit 24 cm Durchmesser und 1,5 cm Wandstärke abgebildet. Zu erkennen ist auch der mitgeschleuderte CFK-Schlauch am äußeren Betonrand.

Dünnwandiger Stab (D-Stab)

Hier beträgt die planmäßige Wandstärke 2,5–3 cm. Die Längsbewehrung wird aus CFK-Drähten ausgeführt, welche über dem Umfang gleichmäßig verteilt sind. In Abb. 4 ist ein D-Stab mit 24 cm Durchmesser und einer Wandstärke von 2,5 cm zu sehen, welcher mit 8 CFK-Drähten vorgespannt wird. Die Zementschlempen wird i. d. R. durch ein Nachschleudern gleichmäßig über den Umfang verteilt.



Abb. 2: ED-Stab mit CFK-Schlauch

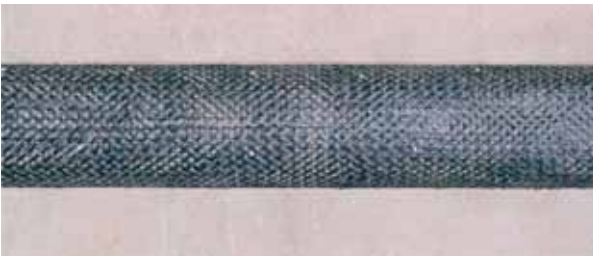


Abb. 3: CFK-Schlauch



Abb. 4: D-Stab mit CFK-Drähten vorgespannt



Abb. 5: CFK-Wendel, CFK-Drähte für D-Stab

Diese CFK-Drähte sind mit einer sandbeschichteten Oberfläche versehen, um den Verbund mit dem umliegenden Beton zu erhöhen. Die Zugfestigkeit der CFK-Drähte liegt bei mind. 2. 500 N/mm². Sie können als Vorspannbewehrung verwendet werden, wobei der Vorspanngrad zwischen 50–60 % liegt. Als Querbewehrung dient eine Wendel aus CFK (Abb. 5).

Der Grund für die Wahl der Kohlefaser als Bewehrung liegt einerseits in den sehr guten mechanischen Eigenschaften (hohe Zugtragfähigkeit, hoher E-Modul, gutes Zeitstandverhalten) sowie andererseits in der chemischen Beständigkeit im basischen Milieu des Betons dieses Werkstoffs.

Hochleistungsbeton

Aufgrund der Dünnwandigkeit der Schleuderbetonstäbe steht weniger Querschnittsfläche zur Druckübertragung zur Verfügung, weshalb der entwickelte Schleuderbeton eine Druckfestigkeit von über 100 N/mm² aufweist. Durch seine hohe Dichtigkeit ist er sehr widerstandsfähig und dauerhaft. Die hohe Verdichtungsenergie, die beim Schleuderprozess entsteht, verbessert zusätzlich die Materialeigenschaften. Der Wasser-Bindmittelfaktor liegt bei ca. 0,30.

Die Bestandteile des Hochleistungsbetons sind:

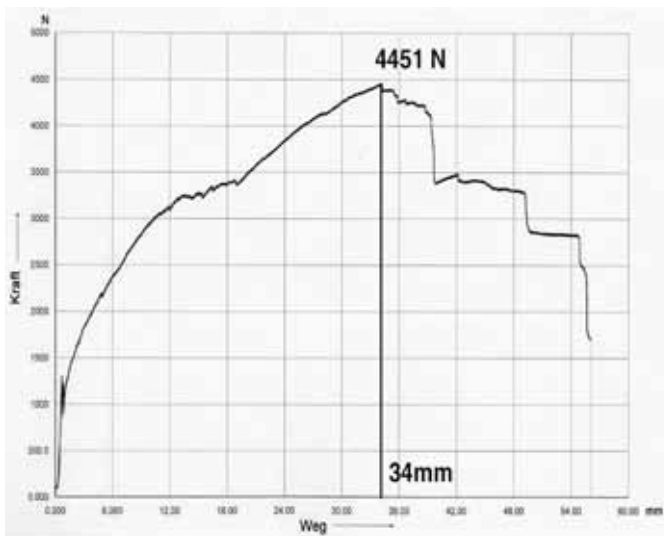
- Microsilika ca. 10 Gew.-% vom Zement
- Hochleistungsverflüssiger auf Polycarboxylatbasis
- hochfester Zuschlag aus Quarzsand mit GK 4 mm

An dieser Stelle soll auf die Problematik der Bestimmung der Druckfestigkeit hingewiesen werden, die bei ultrahochfesten Betonen (UHPC), aber auch bei hochfestem Beton (HPC) auftritt. Entsprechend den gültigen Normen wird die Druckfestigkeit an 15 cm Würfeln bzw. an 15/30 cm Zylindern geprüft. Da bei der Verwendung von UHPC die Bauteildicken fast immer nur wenige Zentimeter betragen, sollten die Druckfestigkeiten dieser

Abb. 6: Scheiteldruckversuch ED-Stab



Abb. 7: Last-Verformungskurve Scheiteldruckverformung



Betone an Probekörpern bestimmt werden, die den Abmessungen ihrer späteren Verwendung entsprechen.

Eine Möglichkeit besteht in der Verwendung der Bruchstücke nach der Biegezugprüfung am 4 x 4 x 16 cm Prisma. Die Lasteinleitungsfläche sollte 4 x 4 cm betragen, welche im Abstand von 1 cm von der geschalteten Stirnseite angeordnet werden kann.

Eine Auswertung von eigenen Festigkeitsversuchen aus 2 identischen Mischungen an insgesamt 6 Stück 15 cm Würfeln und 12 Bruchstücken von der Biegezugprüfung, geprüft nach der Methode wie im vorigen Abschnitt beschrieben, bringt folgenden Zusammenhang:

$$f_{cm, \text{ Bruchstück}} = 1,19 \cdot f_{cm, \text{ Würfel}}$$

Beachtet werden muss die unterschiedliche Lagerung der Probekörper. Die 15 cm Würfel wurden zuerst 7 Tage im Wasser und anschließend bis zum Prüftag an der Luft gelagert, während die 4x4x16 cm Proben lt. den neuen Normen nur wassergelagert wurden.

Aufgrund der geringen Probekörperanzahl sind die ermittelten Werte nur als richtungweisend zu werten.

3 Bauteilversuche

Alle hier angeführten Bauteilversuche werden an Schleuderbetonstäben mit einem Durchmesser von 24 cm durchgeführt.

3.1 Scheiteldruckversuche

Die Scheiteldruckversuche dienen zur Beurteilung der Belastbarkeit in Querrichtung. Die Probekörper haben eine mittlere Wandstärke von 12,3 mm und sind mit einem CFK-Schlauch bewehrt.

Dabei zeigt sich eine hohe Verformbarkeit des Querschnitts (Abb. 6), obwohl die eingesetzten Materialien selbst sehr spröde Eigenschaften besitzen. Der Grund liegt im Systemverhalten. Da die Bewehrung an der Außenseite liegt, erfolgt bei einer nach innen gerichteten Linienbelastung zuerst eine Rissbildung im Scheitel und in der Sohle an der Innenseite. Es bilden sich dort quasi Gelenke, welche die rechte und linke Querschnitts-

seite als Halbschalen verbinden. In Abb. 7 ist beispielhaft ein Last-Vertikalverformungsbild dargestellt. Die Traglast beträgt in diesem Versuch 4,45 kN bei einer Vertikalverformung von 34 mm.

3.2 Biegeversuche

Um die Biegetragfähigkeit zu bestimmen, werden Biegeversuche in der Konstruktiven Versuchsanstalt der TU Graz durchgeführt. In Abb. 8 ist der Versuchsaufbau eines ED-Stabs mit 1,3 cm Wandstärke abgebildet. Aufgrund der geringen Wandstärke besteht die Gefahr eines lokalen Versagens bei der Lasteinleitungsstelle. Deshalb wird die Belastung an der Unterseite mittels hydraulischer Kissen aufgebracht, um eine möglichst gleichmäßige Lasteinleitung zu gewährleisten. Als Auflager dienen Niederhalterungen aus Stahlseilen am Anfang und Ende, welche die Rohre nach unten verankern. Unter den Stahlseilen sind Stahlteile angeordnet, welche wiederum auf einem weichen Elastomer gelagert sind. An jeder Auflagerseite wird eine Kraftmessdose ins Seilsystem angeordnet, welche die halbe Auflagerkraft misst. Um ein lokales Versagen beim Auflager zu vermeiden, wird dort die Wandstärke des Schleuderbetonstabes auf ca. 1,5 cm erhöht. Die Stützweite beträgt 2,84 m.

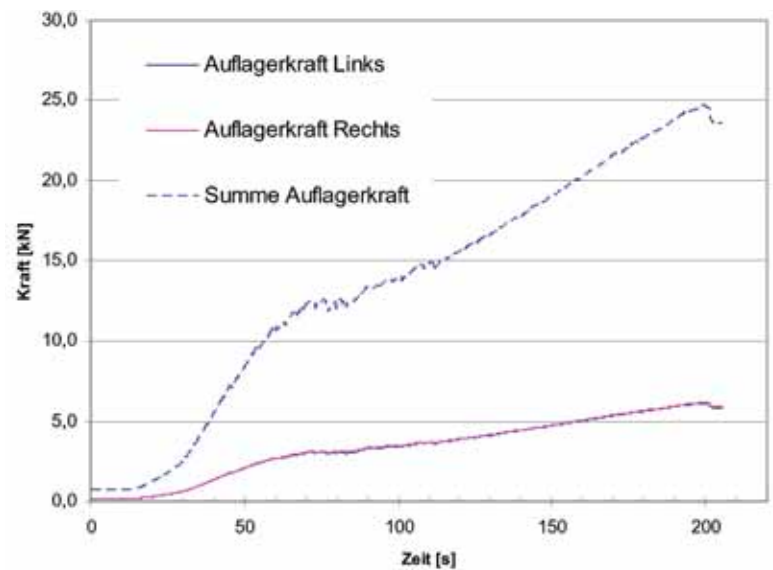
Die Stäbe besitzen eine hohe Verformungsfähigkeit. Die maximale Durchbiegung an der oben liegenden Zugfaser gemessen beträgt im Mittel 32 mm. Die unten liegende Druckfaser wird in Stabmitte um ca. 75 mm nach oben gedrückt. In Abb. 9 ist das Auflagerkraft/Zeit-Diagramm zu sehen, wobei die Zeit mit dem Druck in dem hydraulischen System korreliert.

Bei beiden Versuchen versagt der Querschnitt auf Querbiegung in Feldmitte. Die Ursache liegt in einer dort lokal vorhandenen geringeren inneren Betondeckung des CFK-Bewehrungsschlauches.

Abb. 8: Biegeversuch ED-Stab



Abb. 9: Auflager/Zeit-Diagramm



3.3 Druckversuche

Um das Tragverhalten von nachträglich ausbetonierten Schleuderbetonstäben zu untersuchen, werden Druckversuche durchgeführt.

Folgende Unterschiede in den Materialeigenschaften des geschleuderten Betons und des Füllbetons beeinflussen die Traglast:

- Bruchdehnung, Bruchspannung, E-Modul
- Querdehnungsbehinderung durch verschiedene Querkontraktionszahl
- Umschnürungswirkung durch den bewehrten Schleuderbeton
- Schwinden und Kriechen

Es werden die folgenden 3 Probekörpertypen mit einer Länge von je 70 cm, jeweils 2 Stück, hergestellt:

- schlauchbewehrter hohler Schleuderbetonstab aus HPC (d = 24 cm, Wandstärke 1,6 cm)
- unbewehrter Druckkörper aus SCC (d = 20 cm)
- Verbundstab als ein mit SCC ausbetonierter, schlauchbewehrter Schleuderbetonstab aus HPC (d = 24cm, Wandstärke HPC 1,6 cm)

Die mittlere Druckfestigkeit liegt am Bruchstück des 4 x 4 x 16 cm Prismas beim Schleuderbeton bei 123 N/mm² und beim SCC bei 85 N/mm².

Es zeigt sich, dass die Bruchdehnung des hohlen Schleuderbetonstabs von –1,68 ‰ auf –2,01 ‰ am Verbundstab steigt. Weiters kommt es zu keiner Querdehnungsbehinderung des SCC im Verbundstab, da die Querdehnung des Schleuderbetonstabs aus HPC bei Laststeigerung von ca. 0,2 auf 0,3 steigt, jedoch die des SCC bei ca. 0,25 nahezu konstant bleibt. Aufgrund des relativ geringen Bewehrungsgehalts des Schleuderbetonstabs und der niedrigen Bruchstauchung kommt es praktisch zu keiner Umschnürungswirkung des inneren SCC-Kerns. Dieser Kern wurde 28 Tage nach dem Herstellen des Schleuderbetonstabs betoniert. Da dieser innere Kern von dem sehr dichten Schleuderbetonstab umschlossen ist, kommt es nur sehr langsam zu einer Austrocknung desselben, so dass durch das Schwinden des HPCs rechnerisch sogar eine leichte radiale Druckspannung auf den SCC zum Zeitpunkt des Versuchs auftritt.

3.4 Push-out-Versuche

Um das Verbundverhalten des inneren Kerns aus SCC mit dem äußeren Schleuderbetonstab aus HPC zu untersuchen, werden Push-out-Versuche durchgeführt. Dabei wird der innere Kern aus dem Stabquerschnitt herausgedrückt. Es werden Probekörper mit einer Höhe von 50 mm und 120 mm hergestellt.

Abb. 10: Probekörpertypen der Druckversuche



Abb. 11: Druckversuch Verbundstab



Die mittlere Druckfestigkeit des Schleuderbetons liegt am Bruchstück des 4 x 4 x 16 cm Prismas bei 117 N/mm² und die 15 cm Würfeldruckfestigkeit des SCC liegt bei 79 N/mm².

Es ergibt sich eine mittlere Haftverbundspannung von 2,2 N/mm², wobei aufgrund des quasi starren Verbundes kein Unterschied zwischen den 50 mm und 100 mm hohen Probekörpern festzustellen ist. Nach dem Lösen des starren Verbundes stellt sich eine mittlere Gleitverbundspannung von 0,6 N/mm² ein.

Die systembedingt vorhandene Zementschlempe an der Innenseite des dünnwandigen Schleuderbetonstabs, welche durch ein Nachschleudern gleichmäßig über den Umfang verteilt wird, hat keinen maßgeblichen Einfluss auf die max. Verbundspannungen. Dies zeigt ein Vergleich mit anderen Beton-Beton-Verbundversuchsreihen aus der Literatur. Die innere Oberfläche kann als glatt beschrieben werden.

4 Danksagung

Für die Unterstützung dieses Forschungs- und Entwicklungsprojekts sei mein Dank an die

Fa. MABA Fertigteilindustrie GmbH gerichtet. Besten Dank auch an die Konstruktive Versuchsanstalt der TU Graz für die Betreuung der Versuche.

Literatur

- [1] Sparowitz, L.: Zukunftsvision Filigranbeton, Wien: Zement + Beton, 1999.
- [2] Sparowitz, L., Stebernjak, B.: Innovative Leichtbauweisen aus ultrahochfestem Beton, Wien: Zement + Beton, 2002.
- [3] Mühlmann, M.: Schub in runden Stahlbetonstützen bzw. Pfählen, Diplomarbeit, Graz, 2001.
- [4] Katzenberger, H. G.: Schubprobleme beim Verbund Fertigteilbeton – Ortbeton, Dissertation, Graz, 2002.
- [5] Merta, I.: Shear Strength of Reinforced Concrete Circular Cross Section Members, Diplomarbeit, 2002.
- [6] Drack, E.: Schleuderbeton im Bogenbrückenbau – Eine Machbarkeitsstudie, Diplomarbeit, Graz, 2004.
- [7] Riegler, M.: Tragfähigkeit von nachträglich ausbetonierten Schleuderbetondruckgliedern aus hochfestem Beton, Diplomarbeit, Graz, 2004.
- [8] Radoncic, N.: Verbundverhalten zwischen Kohlefaserstäben und hochfestem Beton, Diplomarbeit, Graz, in Arbeit.

DI Bernhard Stebernjak,
Institut für Betonbau, TU Graz

Abb. 12: Push-out-Versuchskörper



Abb. 13: Push-out-Versuch – Haftverbund

