



**TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DRESDEN**

Fakultät Bauingenieurwesen Institut für Massivbau

Experimentelle Untersuchungen des Verbundverhaltens von Carbonstäben in Betonmatrices

Experimental investigations of the bond behavior between carbon rebars and concrete

Dissertation

**vorgelegt an der Fakultät Bauingenieurwesen
der Technischen Universität Dresden
zur Erlangung der Würde eines
Doktors der Ingenieurwissenschaften
- Dr.-Ing. -**

**von
Alexander Schumann
geboren am 12.11.1989 in Zell-Barl**

**Gutachter
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E. h. Manfred Curbach
Prof. Dr. sc. techn. Mike Schlaich
Univ. Prof. B. Sc. Dipl.-Ing. Dr. techn. Benjamin Kromoser**

eingereicht am: 14. September 2020
verteidigt am: 30. November 2020

Kurzfassung

Das Bauwesen befindet sich in einem ständigen Fortschritt. So war und ist der Stahlbeton der meistverwendetste Baustoff auf der Welt. Jedoch haben sich infolge des stetigen Wandels und Fortschritts der Wissenschaft mittlerweile auch andere Verbundwerkstoffe hervorgetan, die den größten Nachteil, die fehlende Korrosionsbeständigkeit des Stahls, nicht mehr beinhalten. Mit Hilfe von nichtmetallischen Faserverbundwerkstoffen als Bewehrungselemente im Beton ergeben sich folglich dauerhaftere Konstruktionsmöglichkeiten. Jedoch muss das Tragverhalten der neuen Bewehrungselemente aus z. B. Glas- oder Carbonfasern weitreichend untersucht sein, bevor diese effizient und zuverlässig in Bauwerken eingesetzt werden können. Zur Beschreibung des Tragverhaltens der FVK-bewehrten Bauteile ist die Kenntnis über das Verbundverhalten zwischen FVK-Bewehrung und Beton essentiell, um eine Verwendung in der Baubranche finden zu können. Aus diesem Grund wurde im Rahmen dieser Arbeit das Verbundverhalten zwischen verschiedenen Carbonstäben und einem ausgewählten hochfesten Beton weitreichend untersucht, um neue Kenntnisse über die in Deutschland und auch international noch relativ unerforschte Thematik erzielen zu können. Aufbauend auf der Beschreibung des Standes des Wissens zum Verbundverhalten von Stahlbeton, zu FVK-Bauteilen im Allgemeinen und zum Verbundverhalten von FVK-bewehrten Bauteilen, wurden eine Vielzahl an experimentellen Verbundversuchen durchgeführt. Zu Beginn wurden in einer ersten Versuchsserie verschiedene Carbonstäbe mit unterschiedlichen Oberflächenprofilierungen und Herstellungsmethoden im Verbundversuch miteinander verglichen. Im Zuge dessen konnte festgestellt werden, dass die Höhe der übertragbaren Verbundspannungen in starkem Maße von dem Herstellungsverfahren bzw. der Oberflächenprofilierung der Stabvarianten abhängen. Mit Hilfe der Voruntersuchungen konnte die Stabvariante 7 (Carbonstab mit einer Oberflächenprofilierung infolge Fräsung) als Vorzugsvariante für weitergehende Betrachtungen ausgewählt werden. In den anschließenden Kapiteln wurde der zuvor als Referenzstab definierte Carbonstab experimentell umfangreich untersucht sowie erste analytische Modelle vorgeschlagen, um den Einfluss von wesentlichen Parametern auf das Verbundverhalten charakterisieren zu können. Folgende Einflussparameter wurden experimentell erforscht: Betonfestigkeit, Verbundlänge, Carbonstabchargen, Größtkorn/Betonzusammensetzung, Betonierrichtung, Prüfgeschwindigkeit. Zusätzlich erfolgte noch der Vergleich des Verbundverhaltens zwischen dem Carbonstab und einem konventionellem Betonstahl. Die Untersuchungen der verschiedenen Einflussfaktoren zeigten, dass viele Erkenntnisse aus dem Stahlbetonbau auch für den Carbonstab übernommen werden können. Jedoch konnte mit Hilfe der experimentellen Versuche auch gezeigt werden, dass weitere Phänomene auftreten können, die aus dem konventionellen Betonbau nicht bekannt sind. Zusätzlich zu den Auszugversuchen wurde die Spaltneigung des Carbonstabes mit Hilfe von verschiedenen Dehnkörper- und Endverankerungsversuchen in Zusammenhang mit dem hochfesten Beton erforscht. Im Zuge dessen konnte festgestellt werden, dass der Referenzcarbonstab aufgrund des guten Verbundverhaltens zwischen Carbonstab und dem hochfesten Beton bei Probekörpern mit realen Betondeckungen eine zum Teil hohe Spaltneigung aufweist. Durch die Verwendung von verschiedenen Probekörpern mit unterschiedlichen Betondeckungen konnte gezeigt werden, dass der Bewehrungsgrad einen maßgeblichen Einfluss auf die Spaltneigung besitzt. Zum Abschluss der Arbeit wurden ein analytisches Verbundgesetz für den Carbonstab sowie verschiedene Ansätze für die Herleitung eines Bemessungsverbundwertes aufgezeigt. Für die Beschreibung eines Verbundgesetzes wurden die bekannten Ansatzfunktionen aus der Literatur an die experimentellen Ergebnisse angepasst und miteinander verglichen. Dabei stellte sich heraus, dass das aus dem Stahlbeton bekannte Verbundgesetz mit einer geringfügigen Modifikation für den Referenzstab geeignet ist. Somit steht zukünftigen Forschungstätigkeiten ein Verbundgesetz zur Verfügung, welches den gesamten Verlauf der Verbundspannungs-Schlupf-Kurve abbildet. Für die Definition eines möglichen Verbundwertes erfolgte zuerst eine Aufarbeitung der verschiedenen Ansatzfunktion aus dem Stahlbeton sowie weiterer Ansätze aus dem Stand der Technik für FVK-Bauteile. Dabei wurden die jeweiligen Möglichkeiten zur Herleitung eines Verbundwertes für die Berechnung von Carbonbetonbauteilen auf den Referenzcarbonstab übertragen. Im Zuge dessen konnte gezeigt werden, dass zwischen den verschiedenen Ansatzfunktion teils gravierende Abweichungen beste-

hen, die zu unterschiedlichsten Verbundwerten führen. Ebenfalls konnte nachgewiesen werden, dass einige Ansatzfunktionen die realen Bauteilbedingungen nicht berücksichtigen, wodurch sich unrealistische Verbundwerte ergeben können. Insbesondere die Beachtung der höheren Spaltneigung des Carbonstabes erfolgt in der Regel in den verschiedenen Ansätzen nicht. Jedoch muss die höhere Spaltneigung des Carbonstabes im Beton im Vergleich zu konventionellen Stahlstäben Berücksichtigung finden, um abgesicherte und auf der sicheren Seite liegende Verbundwerte definieren zu können. Aufgrund mit Hilfe von Dehnkörperversuchen aufgezeigten Abhängigkeit zwischen dem Schlupf und der Spaltneigung des Stabes im Beton, kommt der Definition des zulässigen Schlupf- und folglich des Verbundwertes eine im Vergleich zum Stahlbeton noch größere Bedeutung zu.

Abstract

The building industry is in a constant state of progress. Thus, reinforced concrete was and is the most widely used building material in the world. However, as a result of constant change and progress in science, other composite materials have now emerged which no longer include the main disadvantage, the lack of corrosion resistance of steel. With the help of non-metallic fibre composites as reinforcing elements in the concrete, more durable construction possibilities result. However, the load-bearing behavior of the new reinforcing elements made of e.g. glass or carbon fibers must be extensively investigated before they can be used efficiently and reliably in structures. In order to describe the load-bearing behaviour of the FRP-reinforced components, the knowledge of the bond behaviour between FRP reinforcement and concrete is essential to be able to find an application in the construction industry. For this reason, the composite behavior between different carbon rods and a selected high-strength concrete has been investigated extensively in this thesis in order to gain new knowledge about this topic which is still relatively unexplored in Germany and internationally. Based on the description of the current state of knowledge on the composite behavior of reinforced concrete, on FRP components in general and on the composite behavior of FRP reinforced components, a large number of experimental composite tests were carried out. In a first series of tests, different carbon rods with different surface profiles and manufacturing methods were compared with each other in the composite test. In the course of these tests it could be determined that the amount of the transmittable composite stresses depends to a large extent on the manufacturing process and the surface profiling of the bar variants. With the help of the preliminary investigations, the rod variant 7 (carbon rod with a surface profiling due to milling) could be selected as the preferred variant for further considerations. In the following chapters, the carbon rod, which had previously been defined as a reference rod, was extensively investigated experimentally and first analytical models were proposed in order to characterize the influence of essential parameters on the composite behavior. The following influencing parameters were experimentally investigated: concrete strength, bond length, carbon rod batches, maximum grain/concrete composition, direction of concreting, test speed. In addition, the bond behavior between the carbon rod and a conventional reinforcing steel was compared. The investigations of the various influencing factors showed that many findings from reinforced concrete construction can also be applied to the carbon rod. However, with the help of the experimental tests it could also be shown that further phenomena can occur, which are not known from conventional concrete construction. In addition to the pull-out tests, the splitting tendency of the carbon rod was investigated by means of various expansion body and end anchoring tests in connection with the high-strength concrete. In the course of this it could be determined that the reference carbon rod shows a partly high splitting tendency due to the good bonding behaviour between carbon rod and the high-strength concrete in test specimens with real concrete coverings. By using different test specimens with different concrete coverings it could be shown that the degree of reinforcement has a significant influence on the gap tendency. Finally, an analytical composite law for the carbon rod and different approaches for the derivation of a design composite value were shown. For the description of a composite law, the known approach functions from the literature were adapted to the experimental results and compared with each other. It turned out that the composite law known from reinforced concrete is suitable for the reference rod with a slight modification. Thus, a composite law is available for future research activities, which represents the entire course of the composite stress-slip curve. For the definition of a possible composite value, first of all the different approach functions from the reinforced concrete as well as further state-of-the-art approaches for FVK components were worked up. Thereby the respective possibilities for the derivation of a composite value for the calculation of carbon concrete components were transferred to the reference carbon rod. In the course of this it could be shown that there are partly serious differences between the different approach functions which lead to different composite values. It could also be shown that some of the preparation functions do not consider the real component conditions, which can lead to unrealistic composite values. In particular, the higher gap tendency of the carbon rod.