5

114. Jahrgang
Mai 2019
ISSN 0005-9900
A 1740

Beton- und Stahlbetonbau

- Optimierungspotenzial bei punktgestützten Deckenplatten
- Stahlfaserbetonbauteile praxisgerecht berechnen
- UHPFRC im Eisenbahnbrückenbau
- Selbstvorspannende ultrahochfeste Betonelemente
- Zeitabhängige Rissbreitenentwicklung
- Bahnbrücke aus bewehrtem UHFB

Ernst & Sohn
A Wiley Brand

Inhalt

Beton- und Stahlbetonbau 5/19

Zum Titelbild: Doppelwellen-Chargenmischer für den Ausbau der Pariser Métro: Sie ist derzeit Europas aufwändigstes Infrastrukturprojekt: Die Pariser U-Bahn-Erweiterung „Grand Paris Express". Vier komplett neue Linien und drei Erweiterungen von bestehenden Linien lassen die Métro bis 2030 zu einem der weltweit größten U-Bahn-Netze anwachsen. Unibéton, eine französische Tochter der HeidelbergCement-Gruppe, setzt bei dem Mammutprojekt auf spezielle Betonrezepturen – und auf einen alternativen Mischertyp. Anstelle eines Planetenmischers hat Unibéton erstmals einen Doppelwellen-Chargenmischer mit Frequenzumwandlern von BHS-Sonthofen im Einsatz. Durch Zusatzmittel und Betonverflüssiger in der Spezialrezeptur ist der Mischprozess besonders herausfordernd. Hier zeigen sich die Vorteile des dreidimensionalen Mischprinzips und der regelbaren Rotationsgeschwindigkeit. (Foto: Société du Grand Paris, Bericht s. Seite A14)

EDITORIAL

Matthias Jacob
285 **Die Baufabrik der Zukunft**

FACHTHEMEN

Kristina Farwig, Manfred Curbach
286 **Durchstanzen von punktgestützten Deckenplatten**

Katharina Look, Peter Heek, Peter Mark
296 **Stahlfaserbetonbauteile praxisgerecht berechnen, bemessen und optimieren**

Nicholas Schramm, Oliver Fischer
307 **Deutschlandweit erstmalige Anwendung von UHPFRC im Eisenbahnbrückenbau**

Benjamin Kromoser, Emanuel Strieder, Johannes Kirnbauer
315 **Selbstvorspannende ultrahochfeste Betonelemente**

Martin Empelmann, Jonas Cramer
327 **Modell zur Beschreibung der zeitabhängigen Rissbreitenentwicklung in Stahlbetonbauteilen**

BERICHTE

Eugen Brühwiler, Herbert Friedl, Christoph Rupp, Hanspeter Escher
337 **Bau einer Bahnbrücke aus bewehrtem UHFB**

Roland Bechmann, Angelika Schmid, Torsten Noack, Werner Sobek
346 **Neuland in Planung und Realisierung: Die Kelchstützen des neuen Stuttgarter Hauptbahnhofs**

357 **BETON- UND STAHLBETONBAU aktuell**
367 **VERANSTALTUNGSKALENDER**

Produkte & Projekte
A4 Parkhäuser – Parkdecks – Tiefgaragen
A14 Infrastruktur-, Verkehrswege- und Tunnelbau
A27 Aktuell

114. Jahrgang
Mai 2019, Heft 5
ISSN 0005-9900 (print)
ISSN 1437-1006 (online)

Peer-reviewed journal
Die Beton- und Stahlbetonbau ist im Journal Citation Report von Clarivate Analytics (vormals Thomson Reuters), sowie in Scopus von Elsevier gelistet.

Impact Factor 2017: 0,717
CiteScore 2017: 0,47

Wiley Online Library

http://wileyonlinelibrary.com/journal/best

Ernst & Sohn
A Wiley Brand

www.ernst-und-sohn.de/beton-und-stahlbetonbau

DOI: 10.1002/best.201900014

Benjamin Kromoser, Emanuel Strieder, Johannes Kirnbauer

Selbstvorspannende ultrahochfeste Betonelemente

Die Aktivierung von mit eisenbasierten Formgedächtnislegierungen bewehrten Betonelementen durch thermische Nachbehandlung

Herrn Prof. Dipl.-Ing. Dr.phil. Dr.techn. Dr.-Ing. E.h. Konrad Bergmeister zu seinem 60. Geburtstag gewidmet

Durch thermische Nachbehandlung können die Eigenschaften von Materialien gezielt beeinflusst werden. Ein Beispiel dafür ist Beton. Durch den Erwärmungsprozess können der Aushärtungsprozess beschleunigt und etwaig vorhandene puzzolanische Zuschlagstoffe zugunsten einer Verbesserung der mechanischen Eigenschaften aktiviert werden. Eisenbasierte Formgedächtnislegierungen reagieren unter bestimmten Umständen auch sensitiv auf Temperatureinwirkung. Eine vorab mechanisch eingeprägte Form, die beispielsweise durch Vordehnen hergestellt wird, kann durch eine thermische Behandlung wieder rückgängig gemacht werden. Wird diesem „Formgedächtniseffekt" ein Widerstand entgegengesetzt, so führt dieser zu einer Zugkraft im Metallteil, die gezielt als Vorspannung genutzt werden kann. Bewehrt man nun Beton mit Stäben oder Matten aus einer eisenbasierten Formgedächtnislegierung und behandelt die Bauteile entsprechend thermisch nach, kann ein Selbstvorspannungseffekt erzeugt werden, der sich vorteilhaft auf die Gebrauchstauglichkeit und Steifigkeit der Bauteile auswirkt. Der vorliegende Beitrag gibt einen Überblick über eine erste Machbarkeitsstudie zu diesem Ansatz. Nach einer Beschreibung der verwendeten Ausgangsmaterialien wird eine erste Serie von Dreipunktbiegeversuchen präsentiert, anhand derer der beschriebene Effekt bereits experimentell nachgewiesen werden konnte. Abschließend werden mögliche Anwendungsfelder vorgestellt.

Self post-tensioning ultra-high performance concrete elements The activation of with iron based shape memory alloys reinforced UHPC elements by thermal follow up treatment
Thermal treatment can be used to influence the properties of materials. One example is concrete. The heating procedure allows to accelerate the hardening process and to activate pozzolanic additives if available in favor of improved mechanical properties. Shape-memory alloys are in some cases also sensitive to temperature treatment. A previously mechanically shaped element, produced for example by pre-stretching can be reversed by thermal treatment. The reverse effect leads to a tensile force in the shape-memory alloy if the shortening of the material is hindered and can therefore be used for post-tensioning. The newly presented approach of the present paper is to reinforce concrete construction parts with shape-memory alloys. A thermal post treatment of such construction parts leads to a self-prestressing effect and to improved properties regarding durability and stiffness. The aim of the presented research was to investigate the feasibility of the approach. The first part of the present paper gives an overview of the construction materials concrete and shape-memory alloys and their behavior in the course of thermal treatment. Subsequently a first test series of three-point bending tests is presented. The results allow to proof the desired self post-tensioning effect. Summarizing possible application areas are described.

1 Einleitung

Beton ist charakterisiert durch eine verhältnismäßig hohe Druckfestigkeit und eine vergleichsweise niedrige Zugfestigkeit. Um das Material möglichst effizient nutzen zu können, müssen Baustrukturen so gestaltet werden, dass hauptsächlich Druckspannungen und nur geringe Zugspannungen auftreten. Oft führen externe Lasten jedoch zu einer Biegebeanspruchung, die sich insbesondere bei dünnwandigen Bauteilen negativ auswirkt. Aufgrund der kleinen statischen Nutzhöhe z. B. bei Schalentragwerken führt dies auch schon bei geringen Beanspruchungen zu relativ hohen Zugbeanspruchungen und in weiterer Folge zu Rissen. Diese sind insbesondere bei Bauteilen mit hohen optischen Anforderungen wie Fassadenplatten oder bei Bauteilen mit hohen Dichtigkeitsanforderungen wie Rohren oder Wasserbehältern problematisch. Eine Möglichkeit, höhere Biegespannungen unter Gebrauchslast rissfrei aufnehmen zu können, ist eine Vorspannung. Für dünnwandige Bauteile wird aktuell meist eine Vorspannung im sofortigen Verbund verwendet. Nachteilig ist dabei, dass die Spannglieder immer einen geradlinigen Verlauf zwischen den Spannvorrichtungen aufweisen. Eine Umlenkung wäre zwar möglich, ist aber praktisch schwer umsetzbar. Janke et al. [1] haben die Idee beschrieben, dünnwandige gekrümmte Elemente mit Formgedächtnislegierung (FGL) zu bewehren.

Die Idee der Autoren ist nun, eine vorgedehnte FGL als Bewehrung zu verwenden und das gesamte Bauteil im Rahmen einer geeigneten Nachbehandlung nach Erreichen einer notwendigen Mindestfestigkeit des Betons thermisch zu aktivieren. Die Betonfestigkeit muss dabei bereits so weit entwickelt sein, dass die Vorspannkräfte aus der Formgedächtnislegierung vom Beton aufgenommen werden können, ohne dass dieser frühzeitig geschädigt

wird. Die thermische Behandlung führt aufgrund der Verkürzung der Bewehrung zu einem Selbstvorspannungseffekt der Betonteile. Im Beton wird je nach Rezeptur und Zeitpunkt der Wärmebehandlung der temperaturabhängige Aushärtungsprozess wesentlich beschleunigt und auch das Schwinden ist nach Abschluss der Behandlung weitestgehend abgeschlossen. Ergänzend können etwaige in der Betonmischung enthaltene puzzolanische Zuschlagstoffe aktiviert werden und es bilden sich zusätzliche Calciumsilikathydrat-Phasen (CSH-Phasen), die zu einer Verbesserung der mechanischen Eigenschaften wie beispielsweise der Druckfestigkeit führen.

Im vorliegenden Beitrag wird im ersten Teil auf die Eigenschaften von ultrahochfestem Beton (engl. Ultra-High Performance Concrete – UHPC), von eisenbasierten Formgedächtnislegierungen und von textilen Bewehrungsgittern aus Carbonfaserverstärkten Kunststoff(CFK)-Rovings (CFK-Textilien) eingegangen. Im zweiten Teil wird zur Überprüfung der Machbarkeit eine erste Tastversuchsserie von Dreipunktbiegeversuchen an dünnwandigen UHPC-Plattenstreifen vorgestellt. Die Versuchskörper wurden mit verschiedenen Materialien bewehrt (unbewehrt, CFK-Textilien), Gitter aus Formgedächtnislegierung) und anschließend unterschiedlich thermisch nachbehandelt (unbehandelt, Wasserbad bei 90 °C und Wasserbad bei 90 °C + Trockenschrank bei 300 °C). Als Beton für diese Machbarkeitsstudie wurde UHPC gewählt, da dieser besonders vorteilhaft auf die thermische Nachbehandlung reagiert. Als Vergleichsbewehrungsmaterial wurden CFK-Textilien gewählt, da diese bei dünnwandigen Bauteilen eine gute Bewehrungsalternative darstellen.

2 Materialien

2.1 Ultrahochfester Beton

2.1.1 Allgemeines

UHPC (ohne Faserbewehrung) lässt sich durch eine Druckfestigkeit von größer 150 MPa und eine höhere Steifigkeit als jene von normalfestem oder hochfestem Beton charakterisieren. Auch die Biegezugfestigkeit ist im Vergleich zu Normalbeton dementsprechend höher und beträgt zwischen 6 und 15 MPa. Diese Eigenschaften werden durch eine hohe Packungsdichte des Materialgefüges erreicht und führen zu guten Dauerhaftigkeitseigenschaften sowie zu einer hohen Widerstandsfähigkeit gegenüber chemischen und mechanischen Beanspruchungen [2]. In den vergangenen Jahren wurde intensiv an der Herstellung und der Optimierung der mechanischen Eigenschaften und Dauerhaftigkeitseigenschaften von UHPC geforscht. Beispielsweise wird in [3, 4] die Entwicklung von anwendungsorientierten UHPC-Mischungen beschrieben.

Das dichte Mikrogefüge im UHPC wird mit einer Reduktion des Wasserbindemittelwerts (w/b-Wert) auf ca. 0,20 und die Zugabe von besonders feinen, inerten und reaktiven Partikeln erreicht. Um die Verarbeitbarkeit bei einem derart geringen w/b-Wert zu erhalten, müssen entsprechende Zusatzmittel wie Fließmittel beigegeben werden. Der meistverwendete reaktive Zusatzstoff für UHPC ist Silikastaub, der zusätzliche Kalzium-Silikat-Hydratphasen bildet und zur Festigkeitssteigerung des Betons beiträgt [5]. Das Materialverhalten von UHPC ist umfassend z. B. in [2] zusammengefasst. Eine große Anzahl an experimentellen Untersuchungen wurde bereits durchgeführt, verschiedene Materialmodelle sind publiziert, z. B. [6, 7]. Ergänzend stehen bereits erste Richtlinien und Normen in einigen Ländern zur Verfügung [8–10]. Es konnten bereits mehrere Praxisprojekte mit UHPC als Baustoff, wie beispielsweise in [11–14] beschrieben, erfolgreich umgesetzt werden. In [15, 16] wird ein guter Überblick über das Bauen mit UHPC gegeben.

2.1.2 Thermische Nachbehandlung

Durch thermische Nachbehandlung lassen sich die bereits sehr guten mechanischen Eigenschaften von UHPC nochmals verbessern [17] und der Aushärteprozess beschleunigen. Es gibt unterschiedliche Methoden zur Nachbehandlung. Die Behandlung kann (a) im Wasserbad erfolgen, wobei die Maximaltemperatur hier durch die Siedetemperatur des Wassers begrenzt ist. Ohne Wassersättigung kann die Behandlung (b) in einem Trockenschrank durchgeführt werden. Für eine vollständige Wassersättigung, auch über 100 °C, werden Autoklaven zur Nachbehandlung verwendet. Dabei handelt es sich um gasdicht verschließbare Behälter, in denen die thermische Behandlung mit Wassersättigung bei Temperaturen über 100 °C möglich ist. Bei der thermischen Nachbehandlung wird die Temperatur üblicherweise mit einer konstanten Rate bis zum Maximum gesteigert. Um einer Mikrorissbildung im Beton aufgrund von Zwangsspannungen zufolge steiler Temperaturgradienten (vgl. [18, 19]) vorzubeugen, müssen die Aufheiz- und Abkühlrampen entsprechend flach gewählt werden. Anschließend wird die Temperatur auf dem maximalen Wert konstant gehalten (daher auch Haltetemperatur genannt), damit diese Temperatur auch im Kern des Bauteils erreicht wird.

Eine erhöhte Nachbehandlungstemperatur kann sowohl die Zementhydratation als auch die puzzolanische Reaktion beschleunigen, wobei der Einfluss auf Letztere von größerer Bedeutung ist [20]. Dies führt zu einer Veränderung der Materialeigenschaften. Beispielsweise führt eine Erhöhung der Haltetemperatur von 60 °C auf 90 °C zu einer Erhöhung der Druckfestigkeit. In [21] werden Ergebnisse vorgestellt, die eine nochmalige Erhöhung der Druckfestigkeit bei einer weiteren Temperatursteigerung auf 200 °C belegen. In [22, 23] wurde verglichen, wie sich eine Wärmebehandlung in einem Klimaschrank zu einer Wärmebehandlung in einem Autoklaven verhält. In beiden Fällen [22, 23] konnte auch die Druckfestigkeit durch die Temperaturbehandlung gesteigert werden, was auf eine Verdichtung der Mikrostruktur im thermisch nachbehandelten UHPC zurückzuführen ist. Grundsätzlich ist eine Wärmenachbehandlung bis etwa 400 °C empfohlen,

wobei sich ab rund 200 °C festigkeitssteigernde kristalline CSH-Phasen, vorwiegend Xonotlith (C_6S_6H), ausbilden [24]. Die obere Temperaturgrenze, bis zu der sich eine thermische Nachbehandlung positiv auswirkt, ist von der Mischungszusammensetzung des Betons abhängig. Eine trockene oder eine zu schnelle Erhitzung mit großen Temperaturgradienten im Bauteil kann sich jedoch negativ auf den Feuchtehaushalt in den Randzonen auswirken und zu Mikrorissen führen, die zum Beispiel die Biegezugfestigkeit reduzieren. Dieser Effekt kann beispielsweise durch eine Wasserlagerung vor dem Erhitzen oder wie bereits beschrieben durch die Verwendung eines Autoklaven kompensiert werden.

2.2 Formgedächtnisstahl

2.2.1 Allgemeines

Formgedächtnislegierungen (FGL) gehören zu den „smart materials", die dazu entwickelt werden, um selbstständig auf sich verändernde Umgebungsbedingungen (Temperatur, mechanische Belastung, pH-Wert, elektrischer Strom) zu reagieren. Im Unterschied zu gewöhnlichen Metalllegierungen besitzen Formgedächtnislegierungen temperatur- und/oder spannungsabhängige Eigenschaften (Steifigkeit, Verformungsverhalten etc.), die auch steuerbar sind. Dies geschieht, indem sich das Metallgitter durch thermische Einwirkung oder mechanische Kräfte verändert. Abhängig von der Legierung können unterschiedliche Eigenschaften wie Superelastizität, ein Zwei-Wege-Formgedächtniseffekt oder ein Ein-Weg-Formgedächtniseffekt auftreten. Je nach Eigenschaft bieten sich unterschiedliche Anwendungskonzepte für FGL im Bauwesen an [25]. Superelastische Ni-Ti-Formgedächtnislegierungen wurden als Bewehrung in zyklisch belasteten Betonbauteilen (Balken und Schub-Wänden) geprüft [26]. Diese Art von FGL kann auch bei passiven Dämpfern angewendet werden. Einer der interessanten Effekte für die Anwendung im Baubereich ist die Rückstellspannung von Ein-Weg-Formgedächtnislegierungen, die zum Vorspannen von Tragelementen verwendet werden kann. Dieser Effekt, der in Abschn. 2.2.2 ausführlicher beschrieben wird, hat in den vergangenen Jahren zunehmende Bedeutung in der Forschung erhalten. Stahlbetonträger wurden mit FGL extern vorgespannt bzw. auf unterschiedliche Art biegeverstärkt: Legierungsstäbe konnten in nachträglich hergestellten Betonschlitzen eingemörtelt [27] oder, wie in [28] beschrieben ist, in einer zusätzlichen Spritzbetonschicht eingebettet werden. In [29] wurden Stäbe aus Fe-FGL eingemörtelt und zusätzlich endverankert. Eine Biegeverstärkung mit extern montierter Formgedächtnislegierung wurde in [30, 31] durchgeführt.

Die Idee eines Stahlbetonträgers mit variabler Steifigkeit und Festigkeit wurde in [32] umgesetzt. Auch Stützen wurden bereits mit Formgedächtnislegierungen umschnürt und damit aktiv in ihrer Querdehnung behindert. Dies wurde in [33, 34] mit Ni-Ti-Legierungen bereits geprüft. Vielfach wird diese Rückstellspannung zur Vorspannung des Betonbauteils eingesetzt. Untersuchungen zur Anwendbarkeit von eisenbasierter Formgedächtnislegierung in Stahlbetonstrukturen (Verbundverhalten, Vorspannwirkung und Auswirkung der Vordehnung auf die verbleibende Steifigkeit und Rückstellspannung) wurden in [35] angestellt.

Auch im Stahlbau gab es bereits Forschung zur Verstärkung von ermüdungsgefährdeten Stahlteilen [36, 37] mit eisenbasierter Formgedächtnislegierung. Die zyklische Belastung von Beton, der mit Ni-TI-Formgedächtnisfasern und Stahlfasern bewehrt wurde, wurde in [38] untersucht. Intelligente selbsteinstellende Lager aus eisenbasierter Formgedächtnislegierung (Fe-28Mn-6Si-5Cr (mass %)) wurden in [39] untersucht.

2.2.2 Ein-Weg-Formgedächtniseffekt und Rückstellspannung

Ein Ein-Weg-Formgedächtniseffekt eignet sich für permanente Vorspannungen, insbesondere von dünnwandigen gekrümmten Bauteilen. In der hier vorgestellten Studie wird eine eisenbasierte Formgedächtnislegierung verwendet, die unter anderem Mangan und Silizium als Legierungsbestandteile enthält. Diese Legierung weist einen sogenannten Ein-Weg-Effekt auf.

Der Formgedächtniseffekt (SME) bei Fe-Mn-Si-Legierungen (eisenbasierte Formgedächtnislegierung) ist das Ergebnis von spannungsinduzierter Phasentransformation von einer γ-Austenit(fcc – face-centered cubic)-Phase in eine ε-Martensit(hcp – hexagonal close packed)-Phase bei Umgebungstemperatur und deren Umkehr bei hohen Temperaturen [40]. Die beiden Phasen sind in Bild 1 dargestellt. Eine Materialcharakterisierung der an der EMPA entwickelten eisenbasierten Formgedächtnislegierung FE-17Mn-5Si-10Cr-4Ni-1(V,C) (mass %) wurde in [41] durchgeführt. Das Ermüdungsverhalten dieser Legierung wurde in [42] untersucht.

Die Phänomene, die bei Temperatur und Spannungseinwirkung in Formgedächtnislegierungen entstehen, sind in

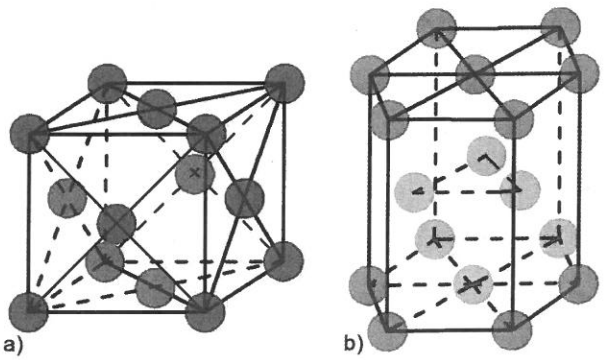

Bild 1 Phasen von Fe-Mn-Si-Legierungen: (a) γAustenit (fcc – Kubisch flächenzentriertes Gitter); (b) ε-Martensit (hcp – Hexagonal dichteste Kugelpackung) [43]
Phases of Fe-Mn-Si-Alloys: (a) γAustenite (fcc – face-centered cubic); (b) ε-Martensite (hcp – hexagonal close packed) [43]

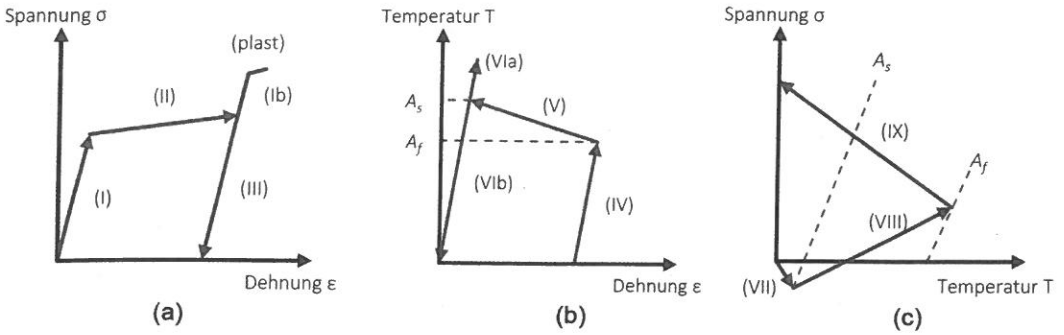

Bild 2 Schematisches Verhalten der Einweg-FGL: (a) mechanisches Vordehnen; (b) Erwärmung der vorgedehnten FGL mit freier Verformbarkeit; (c) Erwärmung der vorgedehnten FGL mit freier Verformbarkeit, [41, 44]
Schematic behavior of one way shape-memory alloy: (a) mechanical pre-straining; (b) thermal activation of the pre-strained SMA with free deformation; (c) thermal activation of the pre-strained SMA with restrained deformation, [41, 44]

[44–46] beschrieben. Das Verhalten des verwendeten Legierungstyps kann schematisch wie folgt erklärt werden.

Wird das Formgedächtnismaterial mechanisch belastet, so gibt es zunächst eine spannungsabhängige Dehnung, die für metallische Werkstoffe in der Regel mit dem Hookschen Gesetz beschrieben werden kann (Bereich I in Bild 2a).

Ab einem bestimmten Punkt nimmt die Steifigkeit des Materials ab (Bereich II). Diese Steifigkeitsabnahme ist nicht wie bei vielen gewöhnlichen Legierungen durch plastische Verformungen verursacht, sondern entsteht durch die Umwandlung des Metallgitters. Die Gitterstruktur wird von γ-Austenit in ε-Martensit umgewandelt. Wenn das Gitter vollständig umgewandelt ist, führt eine zusätzliche Belastung zu einer erneuten elastischen (Bereich Ib), bzw. je nach Festigkeit des Materials auch zu einer plastischen Verformung (Bereich plast). Wird das Material ohne plastische Verformung entlastet (Bereich III), so ergibt sich ein annähernd linearer Verlauf, der parallel zur elastischen Belastung in Bereich I verläuft. Die verbleibende Dehnung resultiert aus der Gitterumwandlung und ist je nach Legierung ganz oder teilweise reversibel. Diese mechanische Verformung wird in weiterer Folge als Vordehnen bezeichnet.

Wird das Metall nun (ohne Verformungsbehinderung) erwärmt, so tritt zunächst eine Temperaturausdehnung ein (Bereich IV), wie sie von gewöhnlichen Legierungen bekannt ist, Bild 2b. Ab einer bestimmten Temperatur, der Austenit-Start-Temperatur (A_s), beginnt sich das Material in die Ursprungsform zurückzuverformen. Das im Bereich II mechanisch erzeugte Martensit-Gitter beginnt sich wieder in Austenit umzuwandeln. Das ist der für diese Legierungsart namensgebende Formgedächtniseffekt. Dieser Vorgang dauert bis zur Austenit-Finish-Temperatur (A_f). Bei weiterer Erwärmung dehnt sich das Material entsprechend seiner Wärmedehnzahl (Bereich VIa). Bei Abkühlung kontrahiert das Material und kann abhängig von Legierung und Vordehngrad am Ende die ursprüngliche Form bei Ausgangstemperatur einnehmen (Bereich VIb).

Wird das Material nach vollendetem Dehnen und Entlasten erwärmt, jedoch durch äußere mechanische Randbedingungen in seiner Verformung behindert, so tritt das in Bild 2c dargestellte Verhalten ein. Zunächst baut sich aufgrund der behinderten Wärmedehnung eine Druckspannung (Bereich VII) im Material auf, bis die Temperatur A_s erreicht ist. Anschließend findet bis zur Temperatur A_f die oben beschriebene Rückumwandlung des Gitters von Martensit zu Austenit (Bereich VIII) statt, welche zu einer Zugspannung im Material führt da sich das Material nicht verformen kann. Das Abkühlen in diesem Zustand führt zu einem weiteren Spannungsanstieg, der durch die behinderte Kontraktion beim Abkühlen des Materials verursacht wird (Bereich IX). Die in der Legierung verbleibende Spannung wird als Rückstellspannung bezeichnet. Die Phasenumwandlungstemperaturen sind spannungsabhängig. Mit höherer Spannung steigt die für den Phasenübergang erforderliche Temperatur, vgl. A_s bzw. A_f in Bild 2b und c. Das reale Materialverhalten ist aus diesem Grund erheblich komplexer, als hier schematisch erklärt wird.

3 Experimentelle Untersuchungen

3.1 Allgemeines

Um den Selbstvorspannungseffekt und somit das Potenzial des Ansatzes experimentell zu untersuchen, wurde eine erste Versuchsserie mit sechs Versuchskörpern durchgeführt. Das Ziel der Untersuchungen ist, die Umsetzbarkeit der Wärmebehandlung zu prüfen und die Auswirkungen des Selbstvorspannungseffektes auf das Biegetragverhalten (Durchbiegung und Tragfähigkeit) von bewehrten UHPC-Plattenstreifen zu untersuchen.

3.2 Eigenschaften der eingesetzten Materialien

Für die Versuche wurde ein UHPC gewählt, da sich dieser insbesondere aufgrund der hohen Festigkeit, der vergleichsweise guten Eignung für eine thermische Nachbehandlung und der aus Sicht der Dauerhaftigkeit geringen erforderlichen Betondeckung für dünnwandige Bauteile eignet. Grundsätzlich liegen sowohl der verwendete Beton als auch die FGL außerhalb des für Stahlbeton üblicherweise abgedeckten Bereichs. Die in EN 1992-1-1 [47]

geregelte Betondeckung gilt somit für Betone nach EN-206 [48] mit einer Festigkeitsklasse von bis zu maximal 115 MPa. Sinngemäß erfüllt aber ein dichterer Beton mit einem begrenztem w/b-Wert die angestrebten Kriterien für eine verringerte Diffusion und bietet somit tendenziell einen besseren Schutz der Bewehrung gegenüber Korrosion. Die Zusammensetzung der Betonmischung ist in Tab. 1 angegeben und der zeitliche Ablauf und die Geschwindigkeit des Mischwerkzeugs sind in Bild 3 dargestellt. Die Mischung wurde mit einem Eirich-Intensivmischer R08 unter Verwendung des Stiftenwirblers hergestellt. Die Mischmenge betrug 40 Liter.

Die Nachbehandlung wurde bei einem Betonalter von 3 Tagen begonnen. Die Probekörper wurden mit 12 K/h aufgeheizt bzw. abgekühlt. Der zeitliche Verlauf der Wärmenachbehandlungen im Wasserbad ist in Bild 4 und für die Nachbehandlung im Wasserbad und im Trockenschrank in Bild 5 dargestellt. Die Proben wurden entweder nicht gesondert nachbehandelt (Charge 1 – Luft 20 °C), durch eine 48 Stunden Lagerung im Heißwasserbecken (Charge 2 – Wasser 90 °C) nachbehandelt oder durch eine 48 h Lagerung im Heißwasserbecken (Wasser 90 °C) und 1 Stunden Haltetemperatur in einem Trockenschrank (Charge 3 – Wasser 90 °C und Luft 300 °C) nachbehandelt. Die Proben werden entsprechend ihrer Nachbehandlung mit L20, W90 oder W90L300 bezeichnet.

Die Eigenschaften des Festbetons sind in Tab. 3 zusammengefasst. Die Werte sind Mittelwerte aus Serien zu je drei Proben bzw. sechs Proben (bei den Druckfestigkeiten am Würfel mit einer Kantenlänge von 40 mm). Die Materialkennwerte zu Beginn der Nachbehandlung wurden in Charge 0 ausschließlich an Prismen geprüft. Das Prüfalter des UHPC der Charge 0 betrug 72 Stunden. Der Beton ohne Nachbehandlung L20 wurde nach 48 Tagen geprüft, was dem Prüfzeitpunkt der Betonplatten entspricht. Der Einfluss der Wärmebehandlung auf die Druckfestigkeit des UHPC ist in Bild 6, auf die Biegezugfestigkeit des UHPC in Bild 7 und auf den Elastizitätsmodul des UHPC in Bild 8 dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass es bei der gewählten Mischungszusammensetzung mit zunehmender Nachbehandlungstemperatur zu einem Anstieg der Druckfestigkeit und zu einer Senkung der Biegezugfestigkeit kommt. Die Druckfestigkeit wurde am Würfel mit 100 mm Kantenlänge und an den Bruchstücken der Prismen aus den Biegezugversuchen (entspricht Würfel mit 40 mm Kantenlänge) bestimmt. Die unterschiedlichen Werte zwischen den Würfelgrößen entstehen durch den Size-Effekt und die veränderte Kontaktfläche mit der Prüfpresse (behinderte Querdehnung). Auch ein Einfluss des Schalungsmaterials auf die Temperatur- und Feuchtigkeitsgradienten im Beton ist nicht auszuschließen. Das

Tab. 1 Mischungszusammensetzung des UHPC
Composition of the UHPC mixture

Bestandteil	Menge [kg/m³]
Wasser	154
Fließmittel	10,79
Konsistenzhalter	14
Schwindreduzierer	7
Entlüfter	1
CEM I 52,5 N C3A-frei	692
Silikastaub	173
Kalksteinmehl	346
Quarzsand 0,1–0,5 mm	928

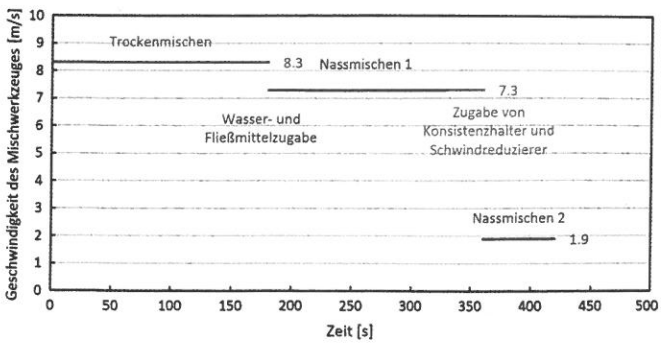

Bild 3 Mischprozess
Mixing process

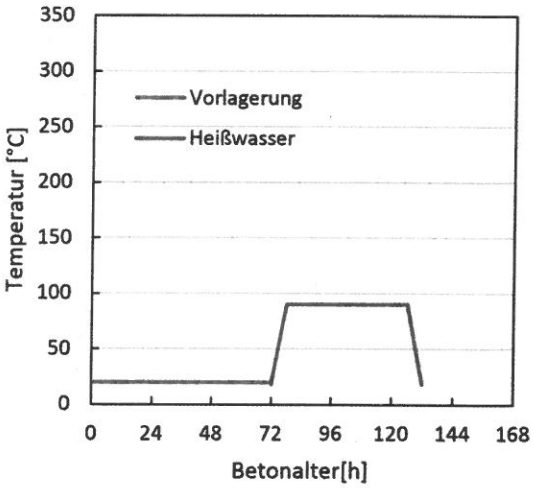

Bild 4 Temperaturverlauf bei der Wärmebehandlung im Heißwasserbecken (W90)
Temperature curve of the thermal treatment in hot water (W90)

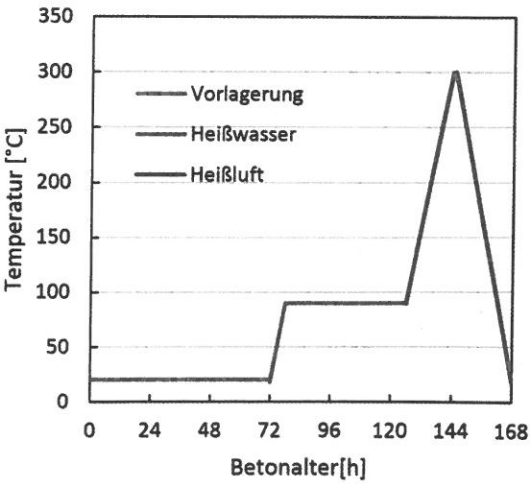

Bild 5 Temperaturverlauf bei der Wärmebehandlung im Heißwasserbecken und im Trockenschrank (W90L300)
Temperature curve of the thermal treatment in hot water and drying oven (W90L300)

Tab. 3 Materialkennwerte des Festbetons (Gesamtalter 72 Stunden bzw. 48 Tage)
Material properties of the hardened concrete (age 72 hours resp. 48 days)

Charge	Biegezugfestigkeit [N/mm²] (Prisma 160×40×40 mm³)	Druckfestigkeit f_{cm} [N/mm²] (Würfel 40×40×40 mm³)	Druckfestigkeit f_{cm} [N/mm²] (Würfel 100×100×100 mm³)	E-Modul E_{cm} [N/mm²] (Prisma 160×40×40 mm³)	Betonalter	Lagerung
0	7,96	91,35	kein Test durgef.	37588	72 Tage	L20
1	15,16	212,81	239,11	35797	48 Tage	L20
2	10,79	195,34	204,75	46766	48 Tage	W90
3	7,35	180,72	176,71	45617	48 Tage	W90L300

unterschiedliche Verhalten durch die Nachbehandlung konnte in dieser Studie nicht vollständig geklärt werden, wobei als mögliche Ursache das unterschiedliche Oberflächen/Volumen-Verhältnis und damit der Einfluss der Randzone angenommen wird. Der Elastizitätsmodul (am Prisma 160×40×40 mm³ mit drei Vorlastzyklen mit $\sigma_u = 10\,\%\ f_c$ und $\sigma_o = 1/3\ f_c$ bestimmt) konnte durch Wärmebehandlung bei 90 °C im Wasserbad geringfügig gesteigert werden und sinkt mit einer weiteren Wärmebehandlung bei 300 °C wieder ab.

Bei der als Bewehrung verwendeten Formgedächtnislegierung handelt es sich um eine Produktionscharge, bei der keine direkte Bestimmung der Materialeigenschaften durchgeführt wurde. Im Fokus dieser Veröffentlichung stehen die Überprüfung der Machbarkeit des Selbstvorspannungseffektes und die Untersuchung des Einflusses von unterschiedlichen Nachbehandlungsvarianten auf die Kombination der beiden verwendeten Materialien. Eine Materialcharakterisierung kann wie in [41] durchgeführt werden. Aus den Ergebnissen von eigenen Tastversuchen wurden Materialkennwerte rückgerechnet. Da bei diesen Versuchen keine genormten Aufbauten verwendet wurden und die Probenanzahl keine statistische Bestimmung der Materialkennwerte zulässt, werden nur Bereiche für die Materialkennwerte angegeben. Diese sind in Tab. 4 zusammengefasst. Zum aktuellen Stand der Forschung sind keine detaillierteren Angaben zum verwendeten Material möglich. Das Material wurde zu Beginn entsprechend dem in Bild 2a dargestellten Schema vorgedehnt. Die verbleibende Dehnung nach dem Vordehnen und Entlasten ergibt sich zu ca. 4,2 %. Die für die Versuche verwendete Bewehrung ist ein aus einem Stück gefertigtes orthogonales Gitter, bei dem sich die Längsbewehrung aus vier Stäben mit insgesamt 20 mm² ergibt. Die Geometrie ist in Bild 10 dargestellt. Abstand und Querschnitt der Querstäbe sind gleich den Längsstäben. Einen Eindruck über die Geometrie der Bewehrungen geben die Bilder 10 und 13.

Als textile Bewehrung wurde ein expoxiharzgetränktes Carbongelege vom Typ GRID Q142/142-CCE 28 von der Firma solidian verwendet. Die Materialeigenschaften sind in Tab. 5 zusammengefasst. Die Materialkennwerte wur-

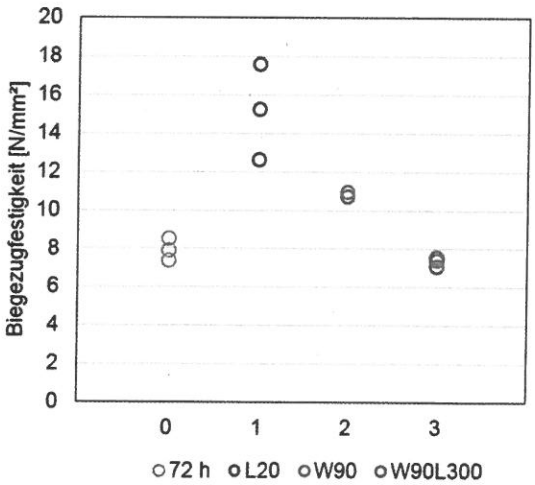

Bild 7 Biegezugfestigkeit (Prisma 160×40×40 mm³)
Flexural strength (prism 160×40×40 mm³)

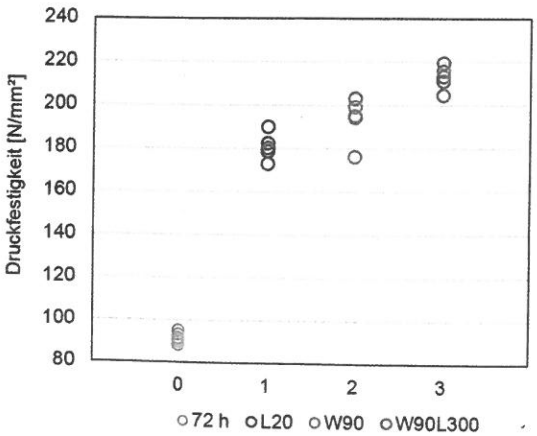

Bild 6 Druckfestigkeit (Prismen Ende 40×40×40 mm³)
Compressive strength (Prism end 40×40×40 mm³)

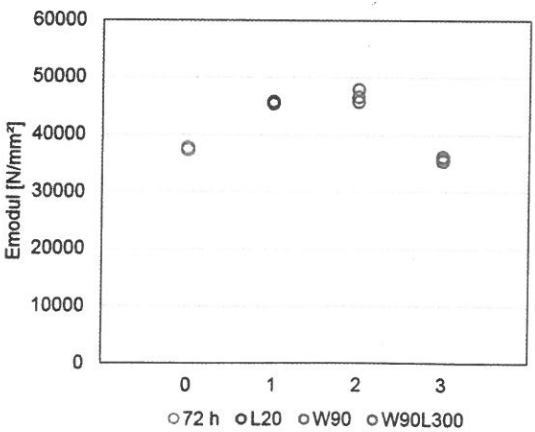

Bild 8 Elastizitätsmodul (Prisma 160×40×40 mm³)
Young's modulus (prism 160×40×40 mm³)

Tab. 4 Materialeigenschaften der FGL, aus Tastversuchen
Material properties of the shape-memory alloy, from tentative tests

Querschnitt A_s [mm²]	Nominelle Zugfestigkeit $f_{u,nom}$ [N/mm²]	Verbleibende Dehnung nach dem Vordehnen ε [%]	Austenit-Start-Temperatur A_s [°C]	Austenit-Finish-Temperatur A_f [°C]
20	1000	4,2	>50	>300

Tab. 5 Materialeigenschaften der textilen Carbonbewehrung ([49] nach dem in [50, 51] beschriebenen Prüfverfahren)
Material properties of the textile carbon reinforcement ([49], test method according to [50, 51])

	Type
Bezeichnung	solidian GRID Q95/95-CCE-38
Fasermaterial	Carbon
Matrixmaterial	Epoxidharz
Maschenweite	38 mm
Querschnittsfläche eines einzelnen Rovings	3,62 mm²
Feinheit der Rovinge (in beide Richtungen)	6400 tex
Querschnittsfläche des Gitters	95 mm²/m
Zugfestigkeit in Längsrichtung (Mittelwert)	3200 MPa
Zugfestigkeit in Querrichtung (Mittelwert)	3300 MPa
Zugfestigkeit, in Längsrichtung (charakteristisch)	2300 MPa
Zugfestigkeit in Querrichtung (charakteristisch)	2000 MPa
Elastizitätsmodul in Längsrichtung	220 GPa
Elastizitätsmodul in Querrichtung	205,000 MPa
Wichte	0,48 kg/m²
Rovingorientierung	0°/90°

den vom Hersteller [49] mit dem in [50, 51] beschriebenen Prüfverfahren bestimmt. Weitere Versuche zum Zugtragverhalten von mit diesem Textil bewehrten UHPC-Prüfkörpern sind in [52] beschrieben. Textile Bewehrungselemente hergestellt aus CFK weisen keine korrosiven Eigenschaften auf, was eine Schutzwirkung durch eine Betondeckung nicht mehr notwendig macht. Es ist lediglich auf einen ausreichend guten Verbund zu achten und zu gewährleisten, dass die Kräfte in der Betondeckung umgeleitet werden können. Aus diesem Grund eignen sich CFK-Textilien gut für dünnwandige Betonbauteile. Ziel der Autoren in der vorgestellten Vorversuchsserie war, durch die zusätzliche Prüfung von CFK-bewehrten Platten eine nicht vorgespannte Referenz zu schaffen. Ziel war es nachzuweisen, dass ein möglicher Erstriss, der für optisch anspruchsvolle Bauteile hohe Relevanz hat, bei dünnwandigen Betonbauteilen, die mit thermisch aktivierten mit FGL bewehrt sind, erst bei deutlich höheren Belastungen auftritt. Grundsätzlich können auch textile Bewehrungselemente bei Verwendung geeigneter Vorrichtungen vorgespannt werden. Eine Vorspannung im sofortigen Verbund für gerade textilbewehrte Betonelemente wird beispielsweise in [53] beschrieben. Für die Vorspannung von gekrümmten textilbewehrten Betonelementen im sofortigen Verbund sind den Autoren bis dato keine Ansätze bekannt.

3.3 Versuchskörper und Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau und die Konfiguration der Versuchskörper sind in den Bildern 9 und 10 dargestellt. Die Plattenabmessungen wurden mit 700 mm Länge, 70 mm Breite und 40 mm Höhe festgelegt. Die unterschiedlichen Konfigurationen sind in Tab. 6 aufgelistet. Um eine entsprechende Referenz für die Erstrisskraft mit gleichen Versuchskörperabmessungen und der gleichen Nachbehandlung zu schaffen, wurden die Referenzversuche t5 und t6 mit unbewehrtem UHPC durchgeführt. Als Versuchsaufbau wurde ein Dreipunktbiegeversuch gewählt. Die Last wurde in Plattenmitte eingeleitet. Die innere statische Nutzhöhe der bewehrten Versuchskörper t1 bis t4 betrug 30 mm und die Betondeckung wurde mit 10 mm gewählt. Zur Bestimmung der Verformungen in Feldmitte wurde der Maschinenweg aufgezeichnet. Der Maschinenweg enthält auch die Verformungen im Prüfaufbau, die vor allem bei hohen oder stark variierenden Prüfkräften relevant sind. Für die Überprüfung der Machbarkeit kann diese Wegmessung als ausreichend genau angesehen werden. Die Kraft wurde mithilfe einer Kraftmessdose gemessen. Die Versuche wurden mit einer Prüfgeschwindigkeit von 0,03 mm/min durchgeführt.

Tab. 6 Versuchskörper
Test specimens

Bezeichnung	Bewehrung	Bewehrungsquerschnitt [mm²]	Zugfestigkeit Bewehrung f_t,[N/mm²]	Lagerung
t1	FGL	20[1)]	1000[1)]	Wasserbad 90 °C+Trockenschrank 300 °C
t2	FGL	20[1)]	1000[1)]	Wasserbad 90 °C
t3	CFK-Textil	10,86[2)]	3100[2)]	Wasserbad 90 °C+Trockenschrank 300 °C
t4	CFK-Textil	10,86[2)]	3100[2)]	Wasserbad 90 °C
t5	unbewehrt	–	–	Wasserbad 90 °C+Trockenschrank 300 °C
t6	unbewehrt	–	–	Wasserbad 90 °C

[1)] Eigene Tastversuche
[2)] Herstellerangaben ([49] nach dem in [50, 51] beschriebenen Prüfverfahren)

3.4 Versuchsergebnisse

In Bild 11 ist das Kraft-Verformungsdiagramm für die durchgeführten Versuche dargestellt. Die unverstärkten UHPC-Platten (grün) versagten spröde bei Eintreten des Erstrisses. Die Bruchlast betrug ca. 0,9 kN bei Nachbehandlung im Wasserbad bei 90 °C und ca. 1,4 kN bei Nachbehandlung im Wasserbad bei 90 °C und anschließend 300 °C im Trockenschrank.

Die UHPC-Platten, die schlaff mit CFK-Textilien bewehrt wurden (t3_c W90L300 und t4_c W90 in Blau), erreichten eine Bruchlast von ca. 2,5 kN (nachbehandelt bei 90 °C im Wasserbad) bzw. 1,5 kN (nachbehandelt bei 90 °C im Wasserbad und 300 °C im Trockenschrank). Der Prüfkörper, welcher bei 300 °C nachbehandelt wurde, wies eine erheblich geringere Bruchlast auf. Wie in [54] beschrieben kommt es bereits ab Temperaturen von 100 °C zu einer Reduktion der Zugfestigkeit von CFK-Textilien. Bei niedrigeren Temperaturen bis 400 °C kommt es vorwiegend zu einer negativen Beeinflussung der Epoxidharzmatrix. Es kommt zu einem Versagen des Verbunds zwischen den einzelnen Carbonfasern und zu einer zusätzlichen Schädigung des Betongefüges durch eine Ausdehnung der Matrix [55]. Bei höheren Temperaturen > 400 °C kommt es auch zu einer Schädigung der Carbonfasern [56]. Der negative Einfluss der Nachbehandlung auf das CFK-Textil wurde auch durch eine starke Verfärbung bestätigt. Nach Einschätzung der Autoren wurde dadurch die Matrix geschädigt, Bild 13. Zusätzlich trat nach der Temperaturbehandlung ein Längsriss in der Bewehrungsachse auf, der auf die Expansion der Epoxidharzmatrix zufolge der Wärmeeinwirkung zurückzuführen ist. Der Einsatz der verwendeten CFK-Textilien in Kombination mit hoher Nachbehandlungstemperatur erscheint somit limitiert durch die Temperaturbeständigkeit und das Temperaturdehnungsverhalten der Matrix. Die Probe t4_c W90 zeigte bei 9 mm Durchbiegung den ersten Biegeriss, bei 20 mm tritt das Versagen ein, wie in Bild 13d ersichtlich ist. Das Versagen wurde durch eine Spaltrissbildung in Bewehrungsebene (Delaminieren) infolge der hohen Verbundkräfte eingeleitet. In [57] wird näher auf die Einflussparameter auf die Spaltrissbildung von epoxidharzgetränkten CFK-Textilien eingegangen. Die höchste Erstrisskraft und auch Bruchkraft konnte

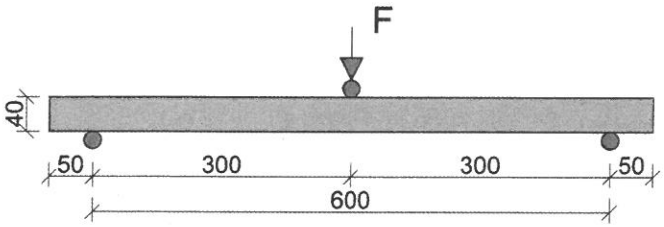

Bild 9 Versuchsaufbau Dreipunktbiegeversuch
Test setup three-point-bending test

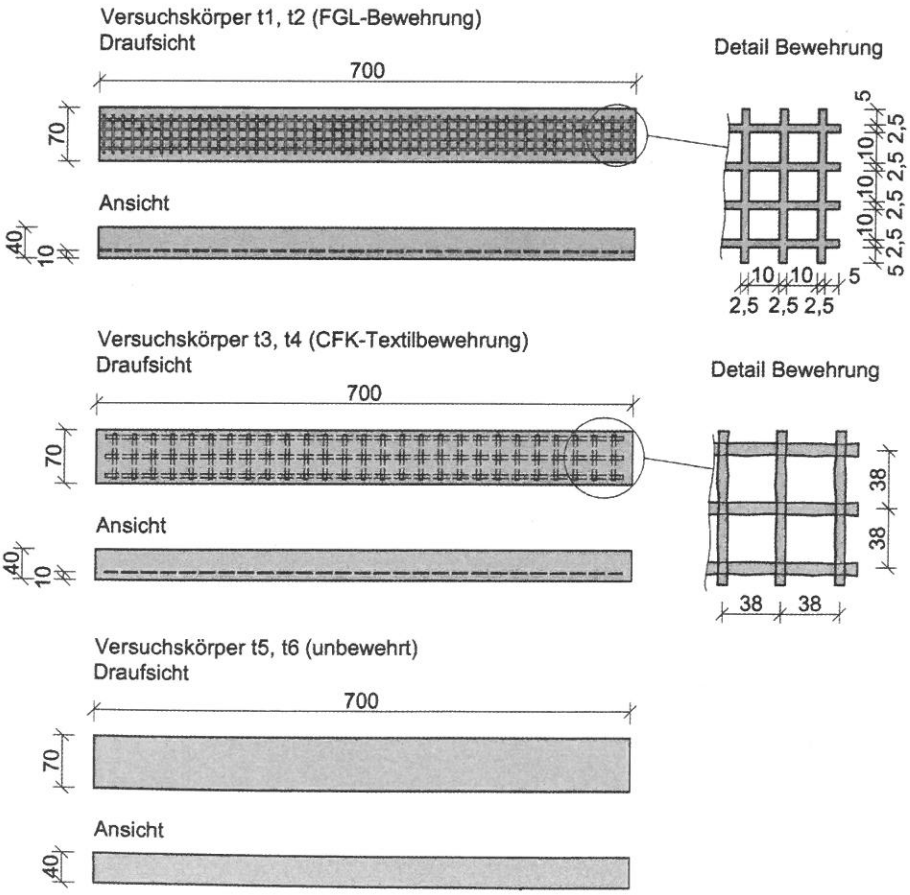

Bild 10 Versuchskörper (6 Stück)
Test specimens (6 pcs.)

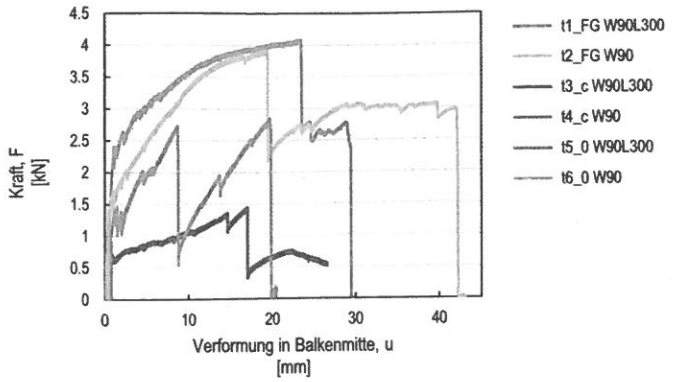

Bild 11 Kraft-Verformungsdiagramm der bewehrten und unbewehrten UHPC-Platten im Dreipunktbiegeversuch
Force-deflection diagram of the reinforced and unreinforced UHPC slab strips in the three-point bending test

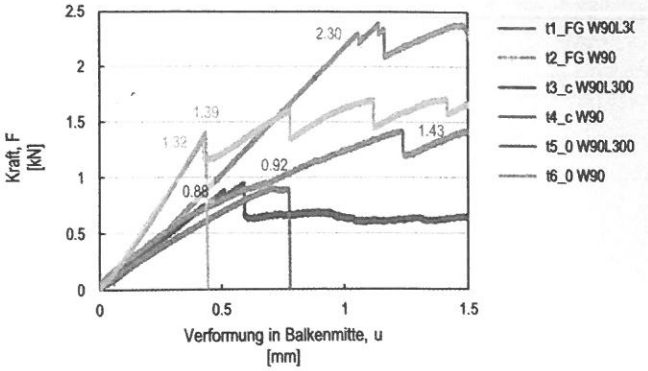

Bild 12 Erstriss der bewehrten und unbewehrten UHPC-Plattenstreifen
Initial crack of the reinforced and unreinforced UHPC slab strips

mit den UHPC-Platten erzielt werden, die mit FGL bewehrt wurden (t1_FG W90L300 und t2_FG W90). Für beide Nachbehandlungsarten liegt die Versagenslast auf ähnlichem Niveau bei ca. 4 kN. Die Erstrisskraft konnte im Vergleich zu den unbewehrten Prüfkörpern (t5_0 und t6_0) bei Nachbehandlung W90 nicht und um + 150 % bei Nachbehandlung W90L300 gesteigert werden. Deutlich erkennbar ist auch die Auswirkung der Nachbehandlung auf die Biegesteifigkeit. Im Probekörper mit der höheren Nachbehandlungstemperatur konnte eine größere Rückstellspannung erzeugt und damit auch eine größere Vorspannkraft in den Beton eingeleitet werden. Dieser zeigte aufgrund der nicht in der Schwerachse verlegten Bewehrung nach der Nachbehandlung bzw. vor dem Test eine Überhöhung von 1,45 mm, die aus dem Selbstvorspannprozess resultiert. Dies wird gut ersichtlich, wenn die Last zum Zeitpunkt des ersten Risses verglichen wird, Bild 12. Das Kriterium, bei welcher Last der erste Riss eintritt, ist insbesondere für die Betrachtung der Gebrauchstauglichkeit wichtig, wenn Risse aus ästhetischen Gründen oder aufgrund der Dichtheit ausgeschlossen werden sollen. Die Rissbildung wurde fotografisch festgehalten und ist in Bild 13 dargestellt. Vergleicht man die Steifigkeit bei 90 °C im Wasserbad (W90) behandelten Platten, ist deutlich, dass die Verformung bei t2 und t6 bis zum ersten Riss nahezu identisch ist. Das deutlich andere Verhalten von t4 kann möglicherweise auf eine bereits vorhandene Schwächung zurückzuführen sein, da die 90 °C Wassertemperatur der Glasübergangstemperatur der Epoxidharzmatrix entspricht und auch ein vorzeitiger Steifigkeitsverlust infolge der Spaltrissbildung beobachtet werden konnte. Vergleicht man die Steifigkeit der Versuche mit dem Nachbehandlungsverfahren W90L300, fällt zunächst die geringere Steifigkeit im Verhältnis zu W90 auf. Ab ca. 0,4 mm Verformung in Plattenmitte bleibt bei Versuch t1 die Steifigkeit erhalten, wohingegen bei t3 und t5 eine Steifigkeitsreduktion bemerkbar ist. Eine verstärkte Umlagerung der Zugkräfte auf die vorgespannte Bewehrung und die Entlastung der Zugzone erscheinen hierfür als Ursache plausibel und bestätigen die Vorspannungswirkung der FGL. Zusammenfassend konnte bewiesen werden, dass die Erstrisskraft durch die Aktivierung der FGL deutlich gesteigert werden konnte. Das Ziel der vorgestellten Versuche, die Überprüfung der Machbarkeit des Ansatzes, konnte somit erreicht werden.

4 Anwendungsbereiche

Das Anwendungsgebiet für selbstvorspannende Betonbauteile wird bei dünnen gekrümmten Bauteilen verortet. Es erscheint, soweit dies vom Versuchsumfang her beurteilt werden kann, mit dieser Methode möglich, Beton mit sofortigem Verbund und gekrümmter Bewehrungsführung durch die thermische Nachbehandlung vorzuspannen. Im herkömmlichen Spannbeton ist es nicht möglich, bei gekrümmter Spanngliedführung mit sofortigem Verbund zu arbeiten. Des Weiteren ist es im Spannbetonbau erforderlich, bei nachträglichem Verbund während des Vorspannvorgangs die Presse zur Krafteinleitung am Bauteil abzustützen, wodurch lokal große Kräfte eingeleitet werden. Bei dünnen Bauteilen ist diese Abstützung oft nicht möglich. Eine Anwendung von FGL-bewehrten dünnwandigen Betonbauteilen können dünnwandige Behälter oder Rohre sein, die einen hohen Anspruch an die Wasserdichtheit und damit an eine geringe Rissbildung haben. Besonders hohes Potenzial sehen die Autoren bei der Anwendung des vorgestellten Ansatzes für die Herstellung von dünnwandigen, mehrfach gekrümmten Fassadenplatten. Die hohen Gebrauchslasten aus Windbeanspruchung können so besser aufgenommen werden, ohne ein Auftreten von Rissen befürchten zu müssen.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Im vorliegenden Beitrag wird die Verwendung einer eisenbasierten Formgedächtnislegierung in Kombination mit einer thermischen Nachbehandlung vorgestellt. Ziel der Autoren ist es, durch diesen Ansatz eine Selbstvorspannung von Betonelementen zu erreichen. Dies wurde anhand von ersten Material- (Druck- und Biegezugversuche) und Biegeversuchen (Dreipunktbiegeversuche) an dünnwandigen Plattenelementen im Rahmen einer ersten

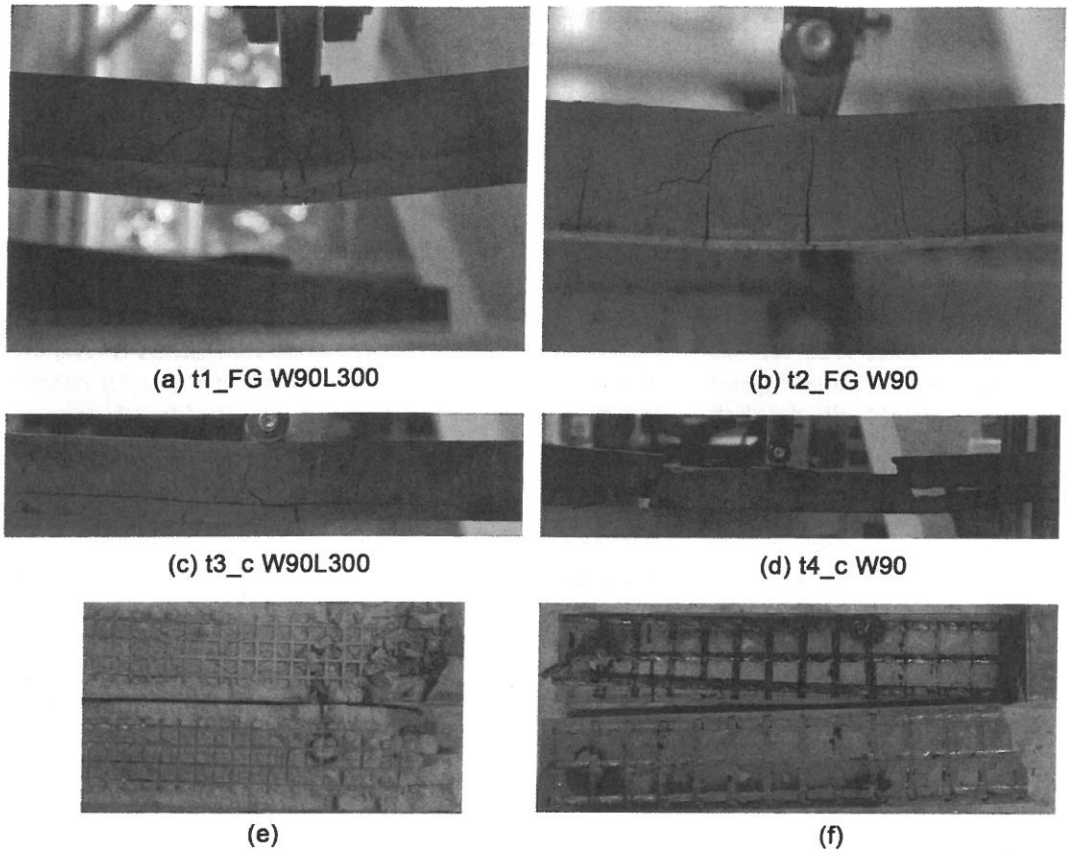

Bild 13 Dokumentation der bewehrten Versuche: (a) Rissbild des Probekörpers t1_FG W90L300; (b) Rissbild des Probekörpers t2_FG W90; (c) Rissbild des Probekörpers t3_c W90L300 ; (d) Rissbild des Probekörpers t4_c W90; (e) Bewehrung des Probekörpers t1_FG W90L300; (f) Bewehrung des Probekörpers t3_c W90L300
Crack pattern and Reinforcement: (a) crack pattern t1_FG W90L300; (b) crack pattern t2_FG W90; (c) crack pattern t3_c W90L300; (d) crack pattern t4_c W90 ; (e) reinforcement t1_FG W90L300; (f) reinforcement t3_c W90L300

Machbarkeitsstudie untersucht. Die für die ersten Versuche verwendete FGL wies einen sogenannten Ein-Weg-Effekt auf. Die Bewehrung wird vor dem Einbau mechanisch vorgedehnt und dann wie eine konventionelle Bewehrung einbetoniert. Die Betonbauteile werden nach Erreichen einer Mindestfestigkeit thermisch nachbehandelt. Dadurch ergibt sich eine Verkürzung der Bewehrung, die durch den umgebenden Beton behindert wird. Es kommt somit zum gewünschten Selbstvorspannungseffekt. Verwendet man eine geeignete Betonmischung, so wirkt sich eine thermische Nachbehandlung positiv auf die Druckfestigkeit aus. Dieser Effekt ist insbesondere bei UHPC besonders ausgeprägt. Vergleichsweise wurden zu den FGL-bewehrten UHPC-Platten als Referenz unbewehrte Platten und mit CFK-Textilien schlaff bewehrte Platten untersucht, um den Einfluss des Effektes auf die Erstrisslast ermitteln zu können. Die Last, bei der der erste Riss auftritt, konnte um +150 % erhöht und somit die These klar bestätigt werden. Aufgrund der geringen Versuchsanzahl sind weitere systematisch aufgebaute Versuchsserien notwendig, um den Effekt genau zu charakterisieren. Geplant sind weiterführende Untersuchungen in unterschiedlichen Bereichen. Insbesondere die Herstellung, Aktivierung und das Tragverhalten von gekrümmten Bauteilen soll geprüft werden. Zudem sind kontinuierliche Verformungsmessungen und kleinformatige FGL-bewehrte UHPC-Proben während des gesamten Aktivierungsprozesses und Untersuchung der Wärmebehandlung auf die Materialeigenschaften des UHPC vorgesehen.

Dank

Die Autoren bedanken sich herzlich bei Herrn Prof. Konrad Bergmeister und Herrn Dr. Raimund Hilber für die gute Zusammenarbeit.

Literatur

[1] Janke, L.; Czaderski, C.; Motavalli, M.; Ruth, J.: *Applications of shape memory alloys in civil engineering structures – Overview, limits and new ideas.* Materials and Structures 38 (2005), Nr. 279, S. 578–592.

[2] Fehling, E.; Schmidt, M.; Walraven, J.; Leutbecher, T.; Fröhlich, S.: *Ultra-High Performance Concrete UHPC: Fundamentals, Design, Examples.* John Wiley & Sons, 2014.

[3] Meng, W.; Valipour, M.; Khayat, K. H.: *Optimization and performance of cost-effective ultra-high performance concrete.* Materials and Structures 50 (2017), Nr. 1, S. 1–16.

[4] Yu, R.; Spiesz, P.; Brouwers, H. J. H.: *Mix design and properties assessment of Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPFRC).* Cement and Concrete Research 56 (2014), S. 29–39.

[5] Zanni, H.; Cheyrezy, M.; Maret, V.; Philippot, S.; Nieto, P.: *Investigation of hydration and pozzolanic reaction in Reactive Powder Concrete (RPC) using 29Si NMR.* Cement and Concrete Research 26 (1996), Nr. 1, S. 93–100.

[6] Magureanu, C.; Sosa, I.; Negrutiu, C.; Heghes, B.: *Mechanical Properties and Durability of Ultra-High-Performance Concrete.* ACI Materials Journal 109 (2012), Nr. 2, S. 177–184.

[7] Ritter, R.; Curbach, M.: *Material Behavior of Ultra-High-Strength Concrete under Multiaxial Stress States.* ACI Materials Journal 112 (2015), Nr. 5, S. 641–652.

[8] Resplendino, J.; Toulemonde, F.: *Designing and Building with UHPFRC.* Wiley-ISTE, 2013.

[9] Gowripalan, N.; Gilbert, R.: *Design Guidelines for Ductal Prestressed Concrete Beams.* In: *The University of NSW,* 2000.

[10] SNR 592052; SIA 2052:2016-03-01: *Ultra-Hochleistungs-Faserbeton (UHFB) – Baustoffe, Bemessung und Ausführung.* Schweizerische Normen-Vereinigung (SNV), 2016.

[11] Aitcin, P.C.; Lachemi, M.; Adeline, R.; Richard, P.: *The Sherbrooke Reactive Powder Concrete Footbridge.* Structural Engineering International 8 (1998), Nr. 2.

[12] Freytag, B.: *UHPC im Konstruktiven Ingenieurbau.* Habilitationsschrift, TU Graz, 2014.

[13] Kalný, M.; Kvasnička, V.; Komanec, J.; Vítek, J. L.; Broz, R.; Koukolik, P.: *Cable-Stayed Footbridge with UHPC Segmental Deck.* Key Engineering Materials 629–630 (2015), S. 64–70.

[14] Methner R.; Müller, R.: *Brückeninstandsetzung, Ertüchtigung und Abdichtung mit Ultrahochfestem-Faserbeton (UHFB).* Beton- und Stahlbetonbau 114 (2019), H. 2, S. 126–133.

[15] Russell, H. G.: *Ultra-high performance concrete: a state of the art report for the bridge community.* U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, 2013.

[16] Resplendino, J.; Toulemonde, F.: *Designing and Building with UHPFRC.* John Wiley & Sons, 2013.

[17] Selleng, C.; Meng, B.; Gröger, K.; Fontana, P.: *Einflussgrößen auf die Wirksamkeit einer Wärmebehandlung von Ultrahochfestem Beton (UHFB).* Beton- und Stahlbetonbau 112 (2017), H. 1, S. 12–21.

[18] Strieder, E.; Hilber, R.; Murr, R.; Bergmeister, K.: *Entwicklung der Materialeigenschaften im jungen Massenbeton.* Beton- und Stahlbetonbau 112 (2017), H. 1, S. 41–49.

[19] Jędrzejewska, A.; Benboudjema, F.; Lacarrière, L.; Azenha, M.; Schlicke, D.; Dal Pont, S.; Delaplace, A.; Granja, J.; Hájková, K.; Heinrich, P.J.; Sciumè, G.; Strieder, E.; Stierschneider, E.; Šmilauer, V.; Troyan, V.: *COST TU1404 benchmark on macroscopic modelling of concrete and concrete structures at early age: Proof-of-concept stage.* Construction and Building Materials 174 (2018), S. 173–189.

[20] Kang, S.-H.; Lee, J.-H.; Hong, S.-G.; Moon, J.: *Microstructural Investigation of Heat-Treated Ultra-High Performance Concrete for Optimum Production.* Materials 10 (2017), Nr. 9, Sep. 2017.

[21] Rhau, M.; Schnellenbach-Held, M.; Welsch, T.: *Einfluss der thermischen Behandlung auf die Festigkeiten von feinkörnigem ultrahochfestem Beton (UHPC/RPC).* Beton- und Stahlbetonbau 113 (2018), H. 7, S. 535–542.

[22] Müller, U.; Meng, B.; Kühne, H.-C.; Nemecek, J.; Fontana, P.: *Micro texture and mechanical properties of heat treated and autoclaved Ultra High Performance Concrete (UHPC).* Proceedings of the Second International Symposium on Ultra High Performance Concrete, Kassel, 2008.

[23] Von Werder, J.; Simon, S.; Lehmann, C.; Selleng, C.; Fontana, P.; Meng, B.: *Autoclaving of ultra-high performance concrete (UHPC).* ce/papers 2 (2018), Nr. 4, S. 131–136.

[24] Locher, F. W.: *Zement: Grundlagen der Herstellung und Verwendung.* Düsseldorf: Verlag Bau + Technik, 2000.

[25] Motavalli, M.; Czaderski, C.; Bergamini, A.; Janke, L.: *Shape Memory Alloys For Civil Engineering Structures – On The Way From Vision To Reality.* Architecture Civil Engineering Environment 2 (2009), S. 81–94.

[26] Palermo, D.; Abdulridha, A.; Cortes Puentes, W. L.: *Performance of Superelastic Shape Memory Alloy Reinforced Concrete Members.* SMAR 2015 – Third Conference on Smart Monitoring, Assessment and Rehabilitation of Civil Structures, Ramada Plaza Antalya, Türkei, 2017.

[27] Shahverdi, M.; Czaderski, C.; Motavalli, M.: *Iron-based shape memory alloys for prestressed near-surface mounted strengthening of reinforced concrete beams.* Construction and Building Materials 112 (2016), S. 28–38.

[28] Shahverdi, M.; Czaderski, C.; Annen, P.; Motavalli, M.: *Strengthening of RC beams by iron-based shape memory alloy bars embedded in a shotcrete layer.* Engineering Structures 117 (2016), S. 263–273.

[29] Rojob H.; El-Hacha, R.: *Ductility behavior of RC beams strengthened in flexure with NSM Iron-based Shape Memory Alloy bars.* SMAR 2015 – Third Conference on Smart Monitoring, Assessment and Rehabilitation of Civil Structures, Ramada Plaza Antalya, Türkei, 2017.

[30] Michels, J.; Shahverdi, M.; Czaderski, C.: *Flexural strengthening of structural concrete with iron-based shape memory alloy strips.* Structural Concrete 19 (2018), Nr. 3, S. 876–891.

[31] Strieder, E.; Aigner, Ch.; Petautschnig, G.; Horn, S.; Marcon, M.; Schwenn, M.; Zeman, O.; Castillo, P.; Wan-Wendner, R.; Bergmeister, K.: *Strengthening of Reinforced Concrete Beams with Externally Mounted Sequentially Activated Iron-Based Shape Memory Alloys.* Materials 12 (2019), Nr. 3.

[32] Czaderski, C.; Hahnebach, B.; Motavalli, M.: *RC beam with variable stiffness and strength.* Construction and Building Materials 20 (2006), Nr. 9, S. 824–833.

[33] Andrawes, B.; Shin, M.; Wierschem, N.: *Active Confinement of Reinforced Concrete Bridge Columns Using Shape Memory Alloys.* Journal of Bridge Engineering 15 (2010), Nr. 1, S. 81–89.

[34] Shin, M.; Andrawes, B.: *Experimental investigation of actively confined concrete using shape memory alloys.* Engineering Structures 32 (2010), Nr. 3, S. 656–664.

[35] Hong, K.; Lee, S.; Han, S.; Yeon, Y.: *Evaluation of Fe-Based Shape Memory Alloy (Fe-SMA) as Strengthening Material for Reinforced Concrete Structures.* Applied Sciences 8 (2018), Nr. 5.