

# Schlussbericht zu 3DHyBeBe

In Anlehnung an NKBF 98 § 8 und Anlage 2 zum BMBF-Verbundprojekt

Titel

**Zuwendung aus dem Sondervermögen „Energie- und Klimafonds“** – Automatisierte Herstellung und Formgebung von mineralisch gebundenen Endlosfaserbündeln zur Fertigung hochtemperaturbeständiger, räumlicher Bewehrungsstrukturen für Betonbauteile; Teilvorhaben: Konzeptionierung, Bemessung und Validierung der Bewehrungsstruktur im Einsatz

Zuwendungsempfänger (ZE): Johne & Groß GmbH

Förderkennzeichen: 03LB3043A

Vorhabenbezeichnung: 3DHyBeBe

Laufzeit des Vorhabens: 01.11.2021 – 31.05.2024

Dokumentationszeitraum: 01.11.2021 – 31.05.2024

Autoren: Friedbert Hofmann  
Bianka Kupfernagel

## I. Kurzdarstellung des Projektes

### I.1 Aufgabenstellung

Bei den derzeit auf dem Markt erhältlichen nichtmetallischen Bewehrungen finden verschiedene Kunststoffmatrizes Anwendung, um den Verbund der Fasern untereinander und zum umliegenden Beton zu gewährleisten. Im Vergleich dazu bieten mineralische Matrizes den Vorteil, temperaturbeständiger zu sein und gleichzeitig bessere Verbundeigenschaften zur Betonmatrix auszubilden. Das übliche Fertigungsverfahren für Bewehrungskonstruktionen beinhaltet das manuelle Zusammenfügen von Halbzeugen. Hierbei besteht durch Automation des Prozesses ein erhebliches Einsparpotenzial zum einen beim Materialverbrauch und dem personellen Aufwand (siehe dazu I.4). Thema des Projektes war daher die automatisierte Herstellung mineralisch getränkter Carbonfasern als räumliche Bewehrungsstrukturen für Betonbauteile.

Die Aufgabenstellung des Teilvorhabens der Johne & Groß GmbH (kurz: JuG) bestand in erster Linie in der statischen und konstruktiven Auslegung der nichtmetallischen Bewehrung mit mineralischer Tränkung als räumliche Struktur für Betonbauteile. Der Schwerpunkt lag dabei auf der Bemessung ebenjener Bewehrungsstrukturen, wozu aufgrund fehlender Normen in Deutschland zunächst ein geeignetes Bemessungsverfahren entwickelt wurde. Zur Validierung des Bemessungsverfahrens wurden Bauteilversuche durchgeführt und beispielhaft bemessen. Neben der Bewehrungsplanung wurden verschiedene Gesichtspunkte des Herstellungsverfahrens der mineralisch getränkten Bewehrung untersucht. Dazu gehört die Nachbehandlung der getränkten Bewehrung, die Verbindung von Kreuzungspunkten zum Bau komplexer Bewehrungsstrukturen sowie der innerbetriebliche Transport der neuartigen Bewehrungsprodukte.

### I.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Die Johne & Groß GmbH ist eine etablierte Stahlbewehrungsbiegerei, die ihr Produktportfolio seit 2021 um nichtmetallische Formbewehrungen erweitert hat und an deren Entwicklung forscht. Als Teil der Zulieferindustrie für den Betonbau verfügt JuG über zahlreiche Kontakte, um die Anwendung neuartiger Bewehrungsprodukte bewerten und ausprobieren zu können. In Ergänzung der Bewehrungsfertigung bietet JuG die Bemessung nichtmetallisch bewehrter Betonbauteile sowie Bewehrungsplanung an.

Personell kennzeichnet sich JuG durch vier fachkundige Ingenieure, einen Meister sowie über 40 Stahlbetonbauer, die im Bewehrungsbau beheimatet sind, aus. Ein Team aus drei Entwicklungsingenieuren unterstützt die F&E-Arbeit und bringt umfangreiche Kenntnisse aus dem interdisziplinären Strukturleichtbau und der Bemessung von Betonbauteilen mit.

Am Standort Schwepnitz stehen Flächen und Geräte im Werk zur Konfektionierung und Herstellung von Probekörpern und der Realisierung von Demonstratoren zur Verfügung.

### I.3 Ablauf des Vorhabens

Das Projekt ist wie geplant durchgeführt worden. Der Projektzeitraum war ursprünglich vom 01.10.2021 bis 31.03.2024 angesetzt. Aufgrund der Zusendung des Zuwendungsbescheides am 22.10.2021 wurde die Arbeit am Vorhaben erst zum 01.11.2021 aufgenommen. Gemäß dem Änderungsbescheid vom 18.12.2023 erfolgte schließlich eine Laufzeitverlängerung um 2 Monate bis zum 31.05.2024.

Das Teilvorhaben der JuG wurde entsprechend den Hauptaktivitäten in Arbeitspakete gegliedert, welche, wie in der Teilvorhabenbeschreibung festgelegt, bearbeitet wurden. Eine ausführliche Auflistung erfolgt unter Abschnitt II.1.

## I.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand

### Bemessung nichtmetallisch bewehrter Betonbauteile

Zu Beginn des Projektes existierte keine deutsche Normung zur Bemessung nichtmetallisch bewehrter Bauteile. Erst ein halbes Jahr vor Projektende, im Januar 2024, erschien die DAfStb-Richtlinie „Betonbauteile mit nichtmetallischer Bewehrung“, welche in Kombination mit DIN EN 1992-1-1 [1] die Bemessung regelt. In der folgenden Aufstellung wird der Stand der Wissenschaft und Technik zu Projektbeginn beschrieben, der die Grundlage für die Entwicklung des Bemessungskonzeptes darstellte.

Für die Bemessung von Betonbauteilen waren die in Tabelle 1 aufgeführten Regelwerke in Deutschland sowie die in Tabelle 2 aufgeführten internationalen Regelwerke und Normen relevant, welche u.a. auch die Grundlage für die deutsche Normung darstellen.

Tabelle 1: Regelwerke zur Bemessung von stahlbewehrten sowie unbewehrten Betonbauteilen

Kürzel	Titel	Nationalität (Erscheinungsjahr)
DIN EN 1992-1-1 [1] und NA [2]	Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau	Deutschland (2011)
MODEL CODE 2010 [3]	fib Model Code for Concrete Structures 2010	(2010)

Tabelle 2: Internationale Regelwerke und Normen für die Bemessung nichtmetallisch bewehrte Betonbauteile

Kürzel	Titel	Nationales Komitee (Erscheinungsjahr)
ACI 440.1R-15 [4]	Guide for the Design and Construction on Structural Concrete Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Bars	American Concrete Society (2015)
JSCE-CES23 [5]	Recommendation for Design and Construction on Concrete Structures using Continuous Fiber Reinforcing Materials	Japan Society of Civil Engineers (1997)
Design Manual No. 3, Version 2 [6]	Reinforcing Concrete Structures with Fibre Reinforced Polymers; zur Ergänzung der CSA Standard S806-02	ISIS Canada (2007)
fib Bulletin 40 [7]	FRP reinforcement in RC structures	International Federation for Structural Concrete (2007)

## Bewehrungsfertigung und -bau

Bewehrungen für Betonbauten werden üblicherweise aus Stahl gefertigt. Die Stahlbewehrungen werden auf der Baustelle aus 1D- oder 2D-Halbzeugen zusammengesetzt. Die Konfektionierung der Halbzeuge erfolgt bei separaten Unternehmen, den Bewehrungsbauern. Für die Herstellung der Halbzeuge stehen Schneid- und Biegemaschinen zur Verfügung, die einen Teil der schweren Handarbeit mechanisieren oder auch (teil-)automatisieren. Die konstruktive Umsetzung der Bewehrungshalbzeuge ist nicht genormt. Ausgangspunkt für die Bewehrungskonstruktion sind statische Berechnungen sowie konstruktive Überlegungen des Tragwerksplaners, die eine beanspruchungsgerechte Bewehrungsführung aufgrund des potenziell höheren Verlegeaufwands nicht berücksichtigen. Die Berechnungen münden in Bewehrungszeichnungen und -stücklisten, die anschließend an das Bewehrungsbauunternehmen übergeben werden.

Die Substitution konventioneller Stahlbewehrung durch korrosionsbeständige Bewehrungselemente wird mit verschiedenen Fasermaterialien (v.a. Carbon, aber auch Glas und Basalt) mit unterschiedlichem Erfolg versucht. Zumeist werden die Faserstränge in einer Polymermatrix gebunden und ausgeformt, um eine praxisrelevante Formstabilität zu erreichen und den inneren Verbund im Faserbündel sicherzustellen. Durch den Einsatz von Hochleistungsfasern kann die korrosionsanfällige Stahlbewehrung effektiv ersetzt werden. Bei Anwendung im Beton werden die einzelnen Fasern (Filamente) zu Bündeln mit mehr als 50.000 Filamenten zusammengefasst und mithilfe von Pultrusionsverfahren zu geraden Stäben oder mithilfe von textilen Flächenbildungsverfahren zu gitterförmigen oder geschlossenen Gittern verarbeitet. Bei diesen Verarbeitungsverfahren werden die Fasern mit einer polymeren Matrix (Thermoplast oder Duroplast) getränkt. Die Tränkung sichert den inneren Verbund des Faserbündels und die Robustheit des Stabes oder Geleges. Zudem kann mit der polymeren Tränkung auch der Verbund zwischen der Faserbewehrung und dem Beton gesteuert werden. Der Schwachpunkt der Bewehrungen aus Faser-Kunststoff-Verbunden ist die ungenügende Temperaturbeständigkeit. Die polymeren Tränkungen weisen eine Glasübergangs- oder Zersetzungstemperatur auf, die i.d.R.  $< 250 \text{ }^{\circ}\text{C}$  ist. Aus diesem Grund dürfen Betonbewehrungen aus Faser-Kunststoff-Verbunden derzeit nur in Bauteilen eingesetzt werden, die im Brandfall keine kritischen Strukturkomponenten sind.

Aus den o.g. Halbzeugen werden die Bewehrungsstrukturen in kostenintensiver manueller Arbeit gefertigt. Zudem ist eine optimierte, belastungsgerechte Orientierung der Bewehrungsfasern aufgrund der Halbzeugeigenschaften (Stab, Gitter) nur eingeschränkt möglich. Damit werden wertvolle Einsparpotenziale hinsichtlich des Materialeinsatzes nicht konsequent ausgeschöpft. In Summe entstehen bei der Verarbeitung der Bewehrungshalbzeuge hohe Personal und auch unnötig hohe Materialkosten. Im Vergleich zu Stahlbeton sind die neuartigen Bauteile daher oft nicht konkurrenzfähig.

## I.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Die Zusammenarbeit erfolgte ausschließlich mit den Projektpartnern wie in Tabelle 3 aufgeführt. Innerhalb des Projektkonsortiums konnten Erfahrungen, Informationen und Zwischenergebnisse ausgetauscht werden.

Tabelle 3: Projektpartner

Projektpartner	Kurzbezeichnung
Johne & Groß GmbH Friedbert Hofmann Kamenzer Str. 18 01936 Schwepnitz	JuG (Verbundkoordinator)
Technische Universität Dresden Institut für Baustoffe Univ.-Prof. Dr.-Ing. Viktor Mechtcherine Georg-Schumann-Str. 7 01187 Dresden	IfB
Grötschel GmbH Sven Grötschel Kamenzer Straße 5 02994 Bernsdorf	GG

## II. Eingehende Darstellung des Projektes

### II.1 Verwendung der Zuwendung und der erzielten Ergebnisse in Gegenüberstellung der Ziele

#### Marktanalyse und bautechnische Analyse potenziell am Markt substituierbarer Bauteile | AS 1.1

Zeitraum: 01.11.2021 – 31.01.2022

Bei der Marktanalyse und der bautechnischen Analyse potenziell am Markt substituierbarer Bauteile gelang es, auf Grundlage von Rechercharbeit sowie der Befragung von Kunden Probleme des Bausektors zu identifizieren, die mithilfe der innovativen Bewehrung aus mineralisch getränkten Carbonfasern (Engl.: Mineral-impregnated Carbon Fibre; kurz: MCF) gelöst werden können. Die Problematrix wurde dahingehend überprüft, ob die neuartige Bewehrung ebenjene Punkte lösen kann. Anschließend war es möglich, Produktgruppen des Bausektors zu definieren, die ein hohes Anwendungspotential für die neuartige Bewehrung versprechen. Hierbei wurde vor allem der Sektor des Hochbaus identifiziert, da die MCF-Bewehrung temperaturbeständiger performt als die auf dem Markt verfügbare polymergetränkte Bewehrung [8] und damit potenziell auf die Anforderungen hinsichtlich des Brandschutzes ausgelegt werden kann. Relevante Baugruppen im Wohnraum und dem erdberührten Bereich stellen Decken, Wände, Stützen und Unterzüge dar. Um das Material effizient anzuwenden, sind hinsichtlich des Lastabtrags optimierte Bauteile besonders interessant. Für Decken und Wände bieten sich bspw. Sandwichkonstruktionen aus primär und sekundär tragenden Schichten an.

Das Ziel wurde innerhalb des Zeitraums erreicht.

#### Entwurf, Vorbemessung, Evaluation mehrerer Beispielbauteile (2D & 2,5D) sowie Definition einer Vorzugsbewehrungsstruktur | AS 1.2

Zeitraum: 01.12.2021 – 31.03.2022

Es wurde die Vorbemessung für ein modulares Sandwich-Deckenelement (**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**) durchgeführt. Zwischen den beiden hochtragfähigen Deckschichten befindet sich ein gering tragfähiger Schaumbeton (Porenleichtbeton), der vor allem den Wärmedämmschutz gewährleisten soll. Alle Tragschichten sind bewehrt. Die Biegezugbewehrung befindet sich in den Deckschichten, die Schubbewehrung verläuft senkrecht durch die Kernschicht. Daraus ergibt sich eine dreidimensionale Bewehrungskonstruktion, welche in Abbildung 2 als 3D-Modell visualisiert ist.

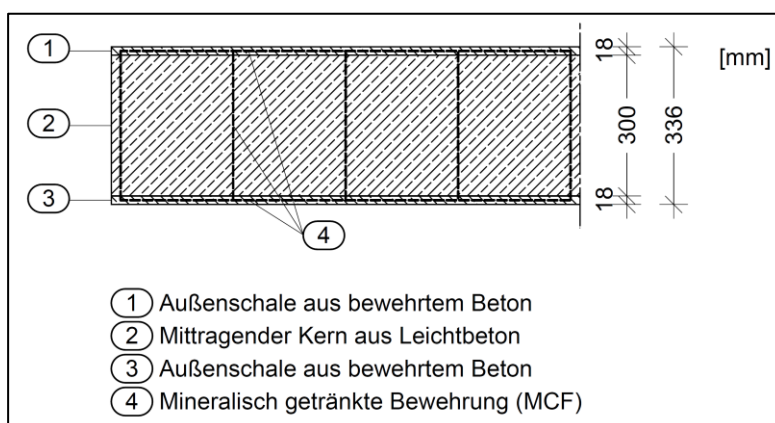


Abbildung 1: Modulares Sandwich-Deckenelement zur Bemessung und Auslegung der räumlichen Bewehrungsstruktur für den Demonstrator

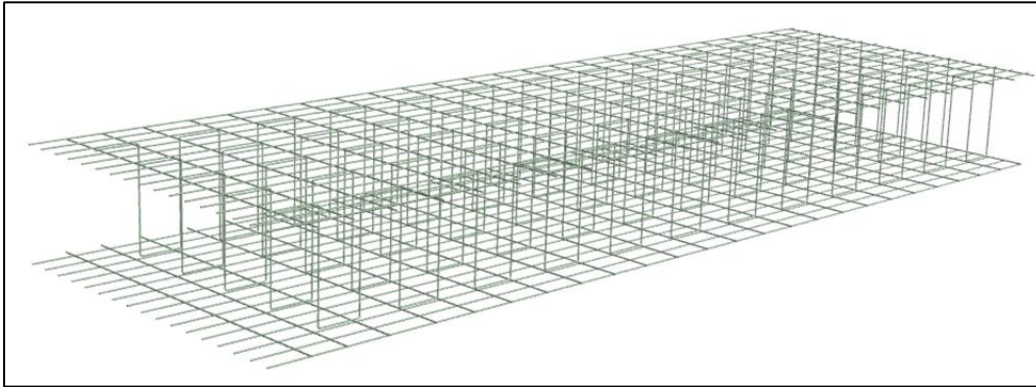


Abbildung 2: 3D-Bewehrungsstruktur für ein modulares Deckenelement

Die Bemessung orientierte sich dabei an DIN EN 1992-1-1. Für spezifische Probleme, welche durch aktuelle Stahl- und Spannbetonnormen nicht ausreichend abgedeckt werden, wurde auf eigene Versuchsergebnisse und internationale Regelwerke zurückgegriffen. Die Schnittgrößenermittlung und Bemessung erfolgte mit der Software RFEM von Dlubal sowie INCA2. Als Ergebnis wurden Bewehrungszeichnungen aus der statischen Vorbemessung abgeleitet.

Mithilfe der generierten Bewehrungszeichnungen war es möglich, erste verfahrenstechnologische Rahmenbedingungen in Kooperation mit den anderen Partnern festzulegen.

Das Ziel wurde innerhalb des Zeitraums erreicht.

### **Validierung und Demonstration eines Bemessungsverfahrens für die Bewehrungsstruktur | AS 1.3**

Zeitraum: 01.08.2022 – 30.11.2022 sowie 01.12.2023 – 31.05.2024

Das Bemessungsverfahren wurde anhand von Vierpunktbiegeversuchen an Plattenstreifen mit MCF-Bewehrung auf Biegung validiert. Der in den Versuchen gemessene (Abbildung 3, Endpunkte der Kurven) und der in der Nachrechnung bestimmte Wert (Abbildung 3, durchgezogene horizontale Linie) für die Bruchkraft wurden gegenübergestellt. Im Mittel beträgt das Verhältnis der gemessenen Bruchkraft zur berechneten Bruchkraft 1,13 mit geringer Abweichung (Variationskoeffizient von 18,8 %). Die Bemessungsfestigkeit im Grenzzustand der Tragfähigkeit ergibt sich dabei mit ausreichender Sicherheit und beträgt in etwa 50 % der tatsächlichen Festigkeit (Abbildung 3, gestrichelte Linie). Das Bemessungsverfahren konnte somit erfolgreich für biegebeanspruchte Bauteile mit MCF-Bewehrung validiert werden.

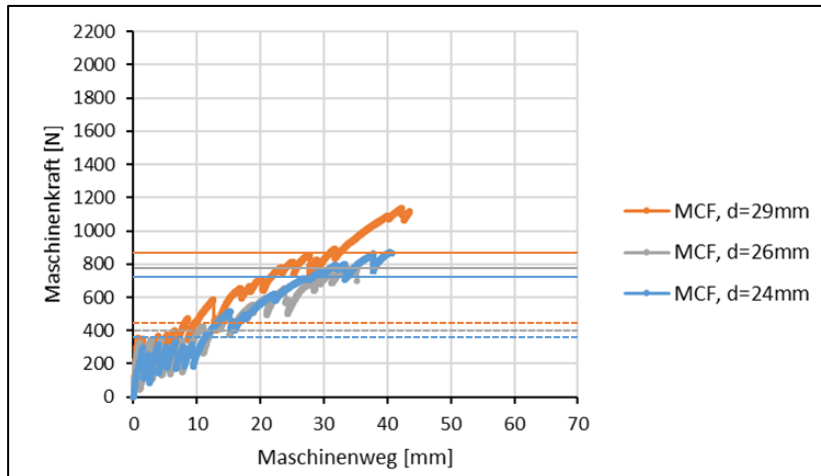


Abbildung 3: Repräsentative Messkurven der mit MCF bewehrten Plattenstreifen zur Validierung der Biegebemessung sowie Darstellung der Bemessungsfestigkeiten (GZT gestrichelt; GZG durchgezogen)

Das Ziel wurde innerhalb des Zeitraums erreicht. Der zweite Bearbeitungszeitraum wurde im Rahmen des Verlängerungsantrages um 2 Monate verlängert.

### Konzeption, Entwicklung und Validierung eines Algorithmus zur Optimierung der Bewehrungstopologie für eine Garn- und Gelegeablage mit kontinuierlicher Faserführung | AS 2.1

Zeitraum: 01.03.2022 – 31.07.2022

In diesem Arbeitsschritt wurden die in AS 1.2 vorläufig ermittelten Bewehrungsverläufe hinsichtlich ihrer Topologie unter Beachtung des Lastabtrags und der Lastverläufe im Bauteil optimiert.

Eine optimale Lösung im Hinblick auf den Materialverbrauch sowie die Verankerung der Bewehrung wäre die Fertigung der 3D-Struktur in einem einzigen Produktionsschritt unter Verwendung eines MCF-Endlosgarns. Zunächst wurde jedoch die 3D-Konstruktion in mehrere 2D-Elemente zerlegt, um den Fertigungsprozess schrittweise zu optimieren. Für das Sandwich-Deckenelement ergeben sich daher die in den Abbildung 9 – Abbildung 11 dargestellten, zweidimensionalen Bewehrungskonstruktionen. Die topologische Optimierung der 3D-Struktur erfolgte auf Grundlage dieser im Folgenden einzeln betrachteten 2D-Strukturen.

Zur Topologieoptimierung der Bewehrung wurden zuerst geeignete Algorithmen recherchiert. Zum einen bestimmen die angreifenden Lasten und daraus entstehenden Schnittgrößen im Bauteil die Lage und die Aufgabe der Bewehrung und somit die Möglichkeiten der Optimierung. Daher wurde die Bewehrung entsprechend ihrer Aufgabe in mehrere Abschnitte mit unterschiedlich hohen Lasten unterteilt. Daraus ergibt sich der topologieoptimierte, gestaffelte Bewehrungsgehalt, der in Abbildung 4 (oben) der Bewehrung in der Zugzone. Für eine optimierte Aufnahme der Zugkräfte infolge von Querkraftbeanpruchung (auch Schub) wurde eine Neigung der Bewehrung verfolgt. Dieses Verfahren ist im Eurocode 2 [1] für Stahlbewehrung geregelt und wurde für die MCF-Bewehrung angepasst (Abbildung 4 (unten)).

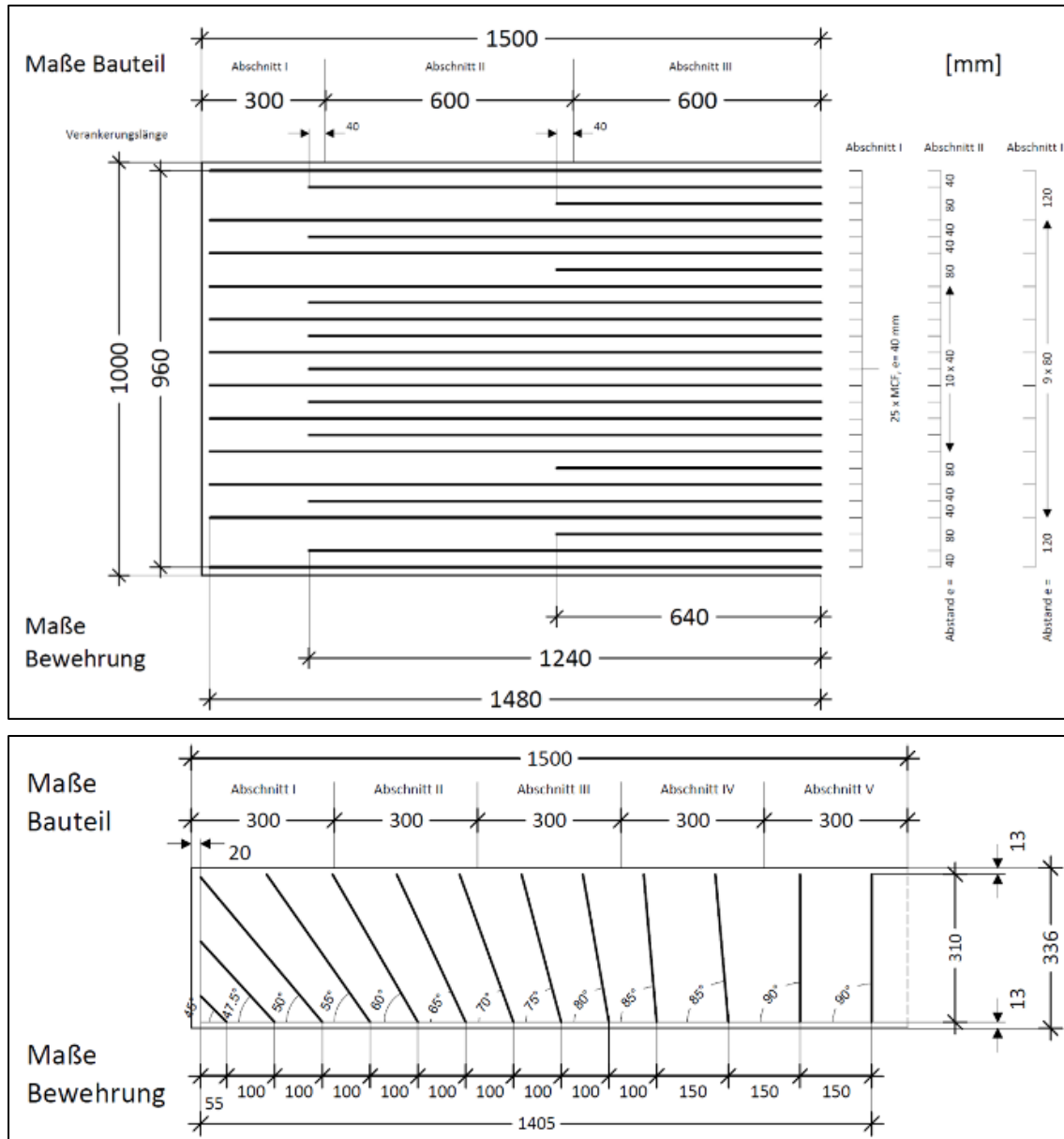


Abbildung 4: Optimierte Bewehrungsanordnung der Biegebewehrung in der Zugzone (oben) und der Schubbewehrung (unten)

Aufgrund der topologieoptimierten Bewehrungsführung konnte eine Materialreduktion von 16,6 % bei rechnerisch gleicher Tragfähigkeit des Bauteils erreicht werden. Auch der Fertigungsaufwand reduziert sich, da sich die Ablagezeit der Bewehrung ebenfalls verkürzt wird und 50 % weniger Umlenkpunkte angeordnet werden müssen.

Das Ziel wurde innerhalb des Zeitraums erreicht.

### Validierung und Demonstration einer Schnellhärtmethode unter Einsatzbedingungen | AS 4.3

Zeitraum: 01.01.2023 – 30.04.2023

In enger Zusammenarbeit mit dem IfB konnte eine Vorzugsvariante für die zementgebundenen MCF definiert werden. Es ergeben sich somit folgende Prozessschritte für das Nachbehandlungsregime:

1. Beginn der Nachbehandlung direkt im Anschluss an die Garnablage.

2. Nachbehandlung unter Abschottung vor Luftbewegung bei 60 °C für 8 h.
3. Abkühlung der Garne auf Raumtemperatur.
4. Lagerung der Bewehrung unter Raumklima im Anschluss an die Nachbehandlung sowie alternativ direkter Einbau und Betonage möglich.

Für die Dauer der Nachbehandlung sind die Garne vor Luftbewegung abzuschotten, um einen Feuchtigkeitsabtransport während des Abbindens zu vermeiden, der zu Mikrorissen und somit Schädigungen in der Matrix führen würde. Eine Demonstration der Schnellhärtmethode zementgebundener Garne unter realen Rahmenbedingungen wurde nicht notwendig, da das entwickelte Nachbehandlungsregimes im Werk ohne Abweichungen erfolgen kann.

Abweichend von der ursprünglichen Materialkombination wurde zusätzlich die Tränkung von Carbonflechtgarnen mit einer Acrylatdispersion der Fa. CHT Germany ausprobiert. Diese hat im Vergleich zur zementgebundenen Tränkung drei entscheidende Vorteile in der Verarbeitung. Die Nachbehandlungszeit unter Temperaturen von 100 °C bis 120 °C läuft innerhalb von 10 Minuten ab, die oberflächliche Abnutzung (Verschleiß) der Elemente der Tränkungseinheit (Rollen und Umlenkelemente) ist deutlich geringer und zudem können die erhärteten Bewehrungsgarne nach erneuter Erhitzung thermoplastisch umgeformt werden.

Das Ziel wurde innerhalb des Zeitraums erreicht.

### **Konstruktive Konzepte zur Herstellung von Knotenpunkten und Entwurf eines Vorzugswerkzeuges zur Herstellung von Knotenpunkten | AS 5.1**

Zeitraum: 01.01.2023 – 31.05.2023

Es ist davon auszugehen, dass auch bei der Fertigung kompletter 3D-Strukturen zur Realisierung spezieller Bauteilgeometrien oder bspw. der zeitlichen Umsetzung verschiedener Bauabschnitte das nachträgliche Verbinden mehrerer Bewehrungsstrukturen erforderlich sein wird.

Dazu wurden bestehende Verbindungssysteme für metallische und nichtmetallische Bewehrungen zur Ausbildung komplexerer Strukturen aus mehreren Elementen analysiert. Schließlich wurden Kabelbinder aus Polyamid 6.6 als Vorzugsvariante mit dem besten Preis-Leistungs-Verhältnis identifiziert, im weiteren Projektverlauf erprobt und zur Konstruktion des Demonstrators verwendet (Abbildung 5).

Die stoffliche Fixierung der einzelnen Kreuzungspunkte innerhalb einer 2D-Struktur wurde von unserem Partner IfB bearbeitet.



Abbildung 5: Knotenpunkt mit Kabelbinder aus Polyamid 6.6 zur Verbindung zweier 2D-Elemente zu einer 3D-Struktur

Das Ziel wurde innerhalb des Zeitraums erreicht.

## Arten und Anforderungen an Transport und Lagerung | AS 6.1

Zeitraum: 01.09.2023 – 30.11.2023

Der Fokus lag auf der Bewertung und Konzipierung eines schädigungsfreien Umschlagprozesses für flächige und dreidimensionale Bewehrungsstrukturen aus anorganisch gebundenen Carbonfasern. Dazu wurden etablierte Transport- und Umschlagkonzepte für Bewehrungsstrukturen mit ihren jeweiligen resultierenden Beanspruchungen betrachtet und teilweise für MCF-Bewehrungen adaptiert und an Mustern erprobt. Als besondere Herausforderung im Umschlagsprozess wurde der Transport der anorganisch getränkten Bewehrung zum Fertigteilwerk bzw. zur Baustelle identifiziert und deshalb experimentell an 2D-Bewehrungsstrukturen untersucht. Letztlich zeigten die Versuche, dass anorganisch getränkte Bewehrungsstrukturen aufgrund der Sprödigkeit der Tränkungsmatrix im erhärteten Zustand und der geringen Querschnittsfläche der Bewehrungsgarne eine hohe Anfälligkeit gegenüber Schädigungen infolge von transversalen Beanspruchungen besitzen.

Empfohlen wird daher die Herstellung und Verarbeitung der Bewehrung im Fertigteilwerk selbst. Dadurch können die Einflüsse aus Transport auf ein kontrollierbares Maß reduziert werden. Ein mögliches Prinzip zum Transport von MCF-Bewehrungsstrukturen am Laufkran wurde in Form eines Transportankers zur schädigungsfreien Aufhängung aufgestellt. Eine beispielhafte Umsetzung ist in Abbildung 6 dargestellt.



Abbildung 6: Nichtmetallischer Transportanker zur Aufhängung der Bewehrung für den innerbetrieblichen Transport

Das Ziel wurde innerhalb des Zeitraums erreicht.

## Anwenderregeln und Belastungsgrenzen | AS 6.2

Zeitraum: 01.11.2023 – 31.12.2023

Im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen wurde festgestellt, dass jegliche mechanische Beanspruchung der mineralisch gebundenen Carbonfaserbewehrungen im hydratisierten Zustand zu einem Abtrag sowohl der Matrix als auch der Kohlefaserfilamente führt. Dieser Aspekt ist hinsichtlich der Lagerung sowie einer Weiterverarbeitung zu berücksichtigen.

Für die weitere Entwicklung der Technologie wird daher die Anwendung von anorganisch getränkten Carbonfaserbewehrungen für die Herstellung von Fertigteilen empfohlen und auf eine additive Betonteilfertigung (z.B. für den 3D-Druck mit Beton) auf Ortbetonbaustellen begrenzt. Eine Anwendung der erhärteten MCF-Bewehrung unter den konventionellen Bedingungen auf Ortbetonbaustellen ist nicht zu empfehlen. Dies ist zum einen mit dem Schädigungsrisiko bei der Verarbeitung der Bewehrung und zum anderen den erhöhten Anforderungen an die Einhaltung der Lagegenauigkeit bei der Betonage begründet.

Das Ziel wurde innerhalb des Zeitraums erreicht.

## Erarbeitung von Prüfmethoden zur Charakterisierung wesentlicher Eigenschaften flächig geschlossener Bewehrungsstrukturen | AS 7.4

Zeitraum: 01.06.2023 – 31.01.2024

Folgende mechanische Kenngrößen der Bewehrung werden für die Bemessung von bewehrten Betonbauteilen benötigt:

- Zugfestigkeit (MW und 5%-Quantil),
- Bruchdehnung (5%-Quantil),
- Zug-E-Modul (MW),
- Verbundmodul (5%-Quantil).

Zur Bestimmung dieser Kenngrößen können folgende Versuchsarten angewendet werden:

- Zugversuche an MCF-Einzelgarnen,
- Zugversuche an MCF-Bewehrungsstrukturen im Verbund mit Beton,
- Verbundversuche an MCF-Einzelgarnen,
- Verbundversuche an MCF-Bewehrungsstrukturen im Verbund mit Beton.

Das Ziel wurde innerhalb des Zeitraums erreicht. Der Bearbeitungszeitraum wurde im Rahmen des Verlängerungsantrages um 2 Monate verlängert.

## Materialprüfung der geschlossenen Bewehrungsstrukturen und Herstellung des Demonstrators | AS 7.5

Zeitraum: 01.11.2023 – 31.05.2024

Zur Bestimmung der oben genannten Kenngrößen fanden folgende Versuchsarten Anwendung (Abbildung 7):

- Zugversuche an MCF-Einzelgarnen und
- Verbundversuche an MCF-Einzelgarnen.

Die Ergebnisse der Untersuchungen, die die Grundlage für die Validierung des Bemessungsansatzes bildeten, sind in

Tabelle 4 dargestellt. Die für die Bemessung relevanten Werte sind fett gedruckt.

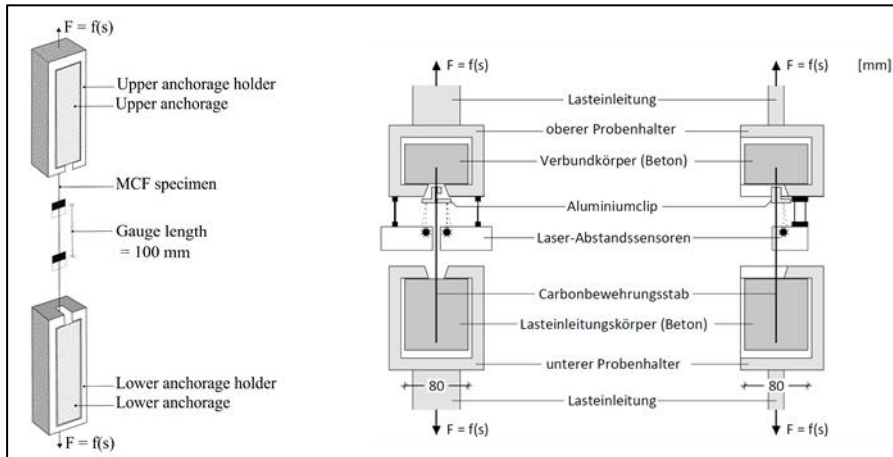


Abbildung 7: Schematischer Versuchsaufbau zur Bestimmung der relevanten mechanischen Eigenschaften der MCF-Bewehrung; Einzelgarnzugversuch des IfB (links, Quelle: Jitong Zhao), Auszugversuch am Einzelgarn des IfB (rechts)

Tabelle 4: Ermittelte Festigkeitswerte der robotisch abgelegten MCF-Bewehrung

Eigenschaft	Zugfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	Dehnung [‰]	E-Modul [N/mm <sup>2</sup> ]
<b>Mittelwert</b>	<b>1.344,48</b>	<b>5,58</b>	<b>232.685</b>
Standardabweichung	179,22	0,90	23.329
Variationskoeffizient [%]	13,33	16,11	10,03
<b>Charakteristische Werte</b>	<b>1.126,79</b>	<b>4,45</b>	<b>208.743</b>

In Zusammenarbeit mit GG sowie IfB wurde die in der Vorbemessung definierte (Abbildung 2) und entsprechend der Optimierung (Abbildung 4) angepasste 3D-Bewehrungsstruktur zur Demonstration der Technologie gefertigt. Die folgenden Abbildungen 9 bis 12 zeigen die Bewehrungsstruktur im Ganzen, aber auch deren einzelne Funktionsgruppen (1) Biegezugbewehrung, (2) Mindestbewehrung und (3) Schubbewehrung.

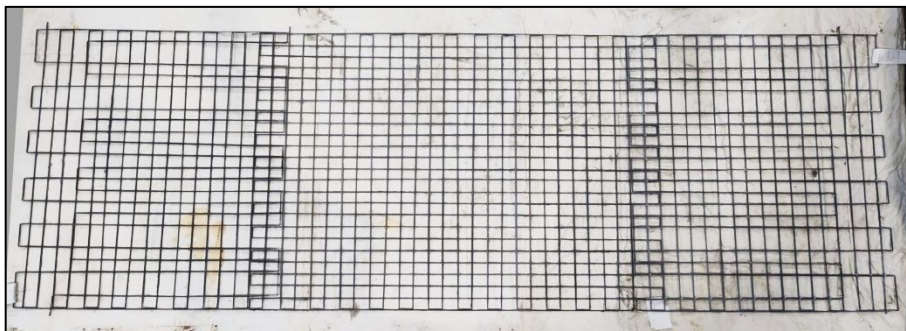
Abbildung 8: Optimierte 3D-Bewehrungsstruktur für ein Sandwichdeckenelement mit den Maßen 3,0 x 1,0 x 0,35 m<sup>3</sup>

Abbildung 9: (1) Biegezugbewehrung in der Zugzone (Bauteilunterseite)

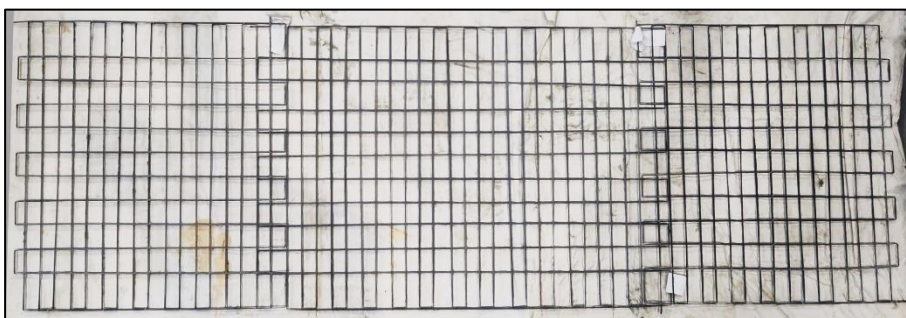


Abbildung 10: (2) Mindestbewehrung in der Druckzone (Bauteiloberseite)

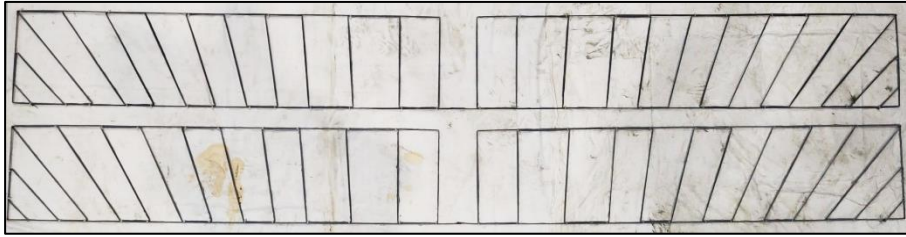


Abbildung 11: (3) Zwei der insgesamt vier Reihen Schubbewehrung

Das Ziel wurde innerhalb des Zeitraums erreicht. Der Bearbeitungszeitraum wurde im Rahmen des Verlängerungsantrages um 2 Monate verlängert.

## II.2 Zahlenmäßiger Nachweis

Der Ausgabenplan wurde mit geringfügigen Abweichungen eingehalten. Entgegen der Vorkalkulation wurden die Reisekosten durch JuG nicht beansprucht, da die Teilnahme an internationalen Konferenzen allein vom Partner IFB übernommen wurde. Die Materialkosten fielen geringer aus. Mehrkosten entstanden bei den Personalkosten aufgrund eines leicht erhöhten PM-Bedarfs für einzelne Arbeitspakete während der Projektlaufzeit.

Der Projektablauf verlängerte sich durch einen verzögerten Projektbeginn sowie die längere Bearbeitungszeit einzelner Arbeitsschritte um insgesamt 2 Monate, siehe hierzu Abschnitt I.3.

## II.3 Notwendigkeit der geleisteten Arbeit

Die im Rahmen des Vorhabens geleisteten Arbeiten, Untersuchungen und Technologieentwicklungen stellen ausschließlich vorwettbewerbliche Arbeiten dar.

Im Rahmen der beschriebenen Untersuchungen des Vorhabens wurde anwendungsorientierte Forschungsarbeit geleistet, in welche in großem Maß grundlegend neue Erkenntnisse eingebunden werden konnten. Die vorangestellte wissenschaftliche Grundlagenermittlung führte letztlich zu der demonstrativen Anwendung.

Das Vorhaben konnte nicht über die Grundfinanzierung der Johne & Groß GmbH abgewickelt werden.

## II.4 Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Die Geplanten Ziele können voraussichtlich nach Ende des Projektes erreicht werden.

Die Erprobung eines weiteren Tränkungsmaterials (siehe dazu II.1 „Validierung und Demonstration einer Schnellhärtmethode unter Einsatzbedingungen“) stellte sich als weitere erfolgreiche Anwendung für die im Projekt entwickelte Tränkungs-technologie heraus. Für JuG ergeben sich voraussichtlich weitere wirtschaftliche Erfolge durch den Vertrieb von neuartigen Strukturen aus thermoformbaren CFK-Flechtstrukturen. Eine erste demonstrative Fertigung der CFK-Flechtstrukturen ist bereits erfolgt.

Weiterhin verfolgt JuG die Bestrebung neben der Bewehrungsfertigung auch die Bemessung nichtmetallisch bewehrter Betonbauteile anzubieten.

Wie in Tabelle 5 dargestellt, ergeben sich hinsichtlich der wirtschaftlichen Erfolgsaussichten keine Abweichungen zum ursprünglichen Verwertungsplan. Die geplanten wirtschaftlichen Ziele können voraussichtlich erreicht werden.

Tabelle 5: Wirtschaftliche Erfolgsaussichten

Lfd. Nr.	Bezeichnung	Ursprünglicher Zeithorizont	Derzeitiger Zeithorizont
Wirtschaftliche Erfolgsaussichten der Verwertung			
1	Schaffung neuer Arbeitsplätze für Ingenieure (Bemessung) und gewerbliche Mitarbeiter (Vertrieb Bewehrungsstrukturen)	Ab 2026	Ab 2026
2	Steigerung von vertriebener Bewehrung und damit einhergehende Umsatzsteigerung.	Ab 2026	Ab 2026
3	Verbesserung der Wettbewerbssituation infolge neuer Produkte.	Ab 2026	Ab 2026
4	Ressourceneffizientes Wirtschaften mithilfe der neuen Bewehrungsstrukturen.	Ab 2026	Ab 2026
5	Stärkung der Digitalisierung im Unternehmen	Ab 2025	Ab 2025

## II.5 Bekanntgewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens während der Durchführung

Außerhalb des Forschungsprojektes sind keine weiteren Studien oder Vorhaben bekannt, die sich mit anorganisch getränkter Carbonfaserbewehrung beschäftigen.

## II.6 Veröffentlichungen

Erfolgte Publikationen:

- J. Zhao, A. A. Hamza, M. Liebscher, A. Bartsch, E. Ivaniuk, M. Butler, J. Kohout, P. Koutník, V. Mechtcherine: Thermomechanical behaviour of textile-reinforced geopolymer concrete based on mineral-impregnated carbon-fibers (MCFs) composites, *Cement and Concrete Composites*, (2024).
- J. Zhao, A. A. Hamza, M. Liebscher, G. Karalis, R. A. Saif, M. Butler, V. Mechtcherine: Temperature induced fast-setting of cement based mineral-impregnated carbon-fiber (MCF) reinforcements for durable and lightweight construction with textile-reinforced concrete, *Cement and Concrete Composites*, under review (2024).

## Literaturverzeichnis

- [1] *DIN EN 1992-1-1: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau*, Berlin: Beuth, 2012.
- [2] *DIN EN 1992-1-1 (NA): Nationaler Anhang - National festgelegte Parameter - Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau*, Berlin: Beuth, 2012.
- [3] fib, *Model Code for Concrete Structures 2010*, Berlin, 2010.
- [4] American Concrete Society, ACI Committee 440, *Guide for the Design and Construction on Structural Concrete Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Bars*, Farmington Hills, 2015.
- [5] Research Committee on Continuous Fiber for Concrete Reinforcement (CFRM), JSCE, *Recommendation for Design and Construction on Concrete Structures using Continuous Fiber Reinforcing Materials*, 1997.
- [6] ISIS Canada Research Network, *Design Manual No. 3 "Reinforcing Concrete Structures with Fibre Reinforced Polymers"*, Winnipeg, 2007.
- [7] fib, Task Group 9.3, *bulletin 40 (technical report): FRP reinforcement in RC structures*, 2007.
- [8] K. Wilhelm, *Verbundverhalten von mineralisch und polymer gebundenen Carbonbewehrungen und Beton bei Raumtemperatur und erhöhten Temperaturen bis 500°C*, Dissertation, Dresden: Schriftenreihe des Institutes für Baustoffe, Heft 2021/3, 2021.
- [9] DAFStb, *Richtlinie (Gelbdruck) "Betonbauteile mit nichtmetallischer Bewehrung"*, Berlin, 2022.
- [10] K. Wilhelm, *Verbundverhalten von mineralisch und polymer gebundenen Carbonbewehrungen und Beton bei Raumtemperatur und erhöhten Temperaturen bis 500 °C*, Dresden, Dissertation 2021.