Schlussbericht zu Nr. 8.2 NKBF 98

Gefördert durch:
Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Zuwendungsempfänger: Hentschke Bau GmbH
Zeppelinstraße 15
02625 Bautzen

Förderkennzeichen: 03LB5009C

Vorhabenbezeichnung: Verbundvorhaben: CRC-BoDeM - Verformung und Rissbildung im Carbonbetonbau – Modelle und Nachweiskonzepte zur Überführung in die Baupraxis; Teilvorhaben: Industrielle Fertigung von bewehrten Betonbauteilen – Teil I

Laufzeit des Vorhabens: 01.03.2022 bis 28.02.2025

I. Kurzdarstellung

1. Aufgabenstellung

Thema des Verbundvorhabens ist die Herleitung und Bereitstellung von allgemeingültigen Modellen und Regelungen für den Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit sowie zur baulichen Durchbildung, damit die Carbonbetonbauweise bzw. die Bauweise von Betonbauteilen mit nichtmetallischer Bewehrung in die baupraktische Anwendung entsprechend dem in Deutschland geltenden Baurecht überführt werden kann.

Die **Ziele** des Verbundvorhabens sind:

(1) Die Ergänzung und Erweiterung der DAfStb-Richtlinie „Betonbauteile mit nichtmetallischer Bewehrung“ (NMB) [DAfStb24] um notwendige Regelungen. Diese sollen in der zweiten Fassung der DAfStb-Richtlinie berücksichtigt werden, die im Zuge der Einführung des neuen Eurocode 2 (FprEC2) [FprEC2] im nationalen Anwendungsdokument für Deutschland (NA(D)) im Anhang R veröffentlicht wird.

(2) Hierzu sollen für Carbonbetonbauteile und carbonbetonverstärkte Stahlbetonbauteile folgende allgemeingültige und praxistaugliche Modelle hergeleitet und bereitgestellt werden:
- Begrenzung der Rissbreiten;
- Begrenzung der Verformungen;
- Begrenzung der zulässigen Spannungen;
- Festlegung der Mindestbetondeckung;
- Nachweis der Verankerung der Biegezug- und Querkraftbewehrung;
- Nachweis von Übergreifungsstößen;
- Konstruktive Details.

(3) Der Abbau von Hemmnissen zum Einsatz von Carbonbeton durch die Darstellungen und Ausführungen im gemeinsamen Schlussbericht, der in Auszügen in ein bauaufsichtlich eingeführtes Regelwerk überführt werden kann;

(4) die Festlegung eindeutiger Vorgaben zur Ermittlung bewehrungsunabhängiger Parameter für die Nachweisführung;

(5) der Ausbau der Vernetzung und des Wissensaustauschs zwischen Forschungseinrichtungen, bauausführenden Unternehmen, Textilherstellern und Normungsgremien;

(6) eine hocheffiziente Ressourcennutzung durch die Verwendung von nichtmetallischer und hochzugfester Bewehrung, was mit einer Reduktion der Bauteilabmessungen und einem minimierten Materialeinsatz von Beton verbunden ist;

(7) die Förderung und Etablierung einer nachhaltigen Bauweise durch Verwendung dauerhafter Materialien mit einer Reduzierung der Lebenszykluskosten und einer Einsparung von CO2;
(8) die Förderung der Recyclingfähigkeit von nichtmetallischen Bewehrungen aus Betonbauteilen und Wiederaufbereitung für die erneute Bewehrungsherstellung.

Die Arbeitsteilung erfolgt entsprechend der Expertise der Partner. Die Zuordnung der ZE zu den Arbeitsschritten (AS), den Arbeitspaketen (AP) und den Aktivitäten (A) wird ausführlich in Abschnitt II dargestellt. Einen Überblick der im Verbundvorhaben geplanten Arbeiten gibt Bild 1.

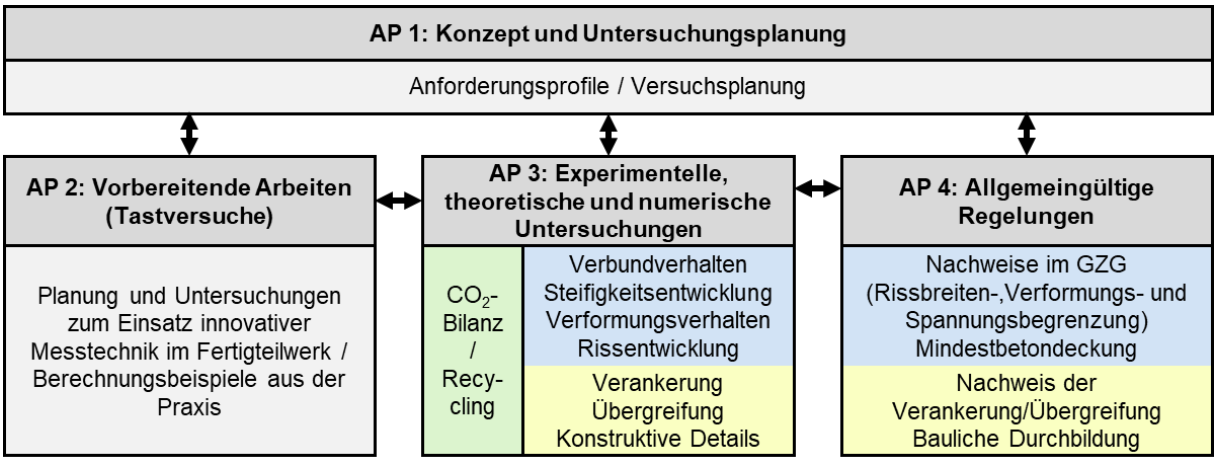


Bild 1: Überblick der Arbeitspakete im Verbundvorhaben

Nachfolgend werden die Arbeitspakete nach Teilprojekten mit den durchgeführten Arbeiten übersichtlich dargestellt.

Für das Teilprojekt der **Hentschke Bau GmbH** waren folgende Aktivitäten in verschiedenen Arbeitspaketen des Verbundvorhabens erforderlich:

- In AP1 „Konzept und Untersuchungsplanung“ sollen mögliche Anforderungen an allgemeines Bewehrungsregeln und an die bauliche Durchbildung unter Berücksichtigung der Anforderungen aus der Sicht der Forschung und der Tragwerksplanung aufgelistet werden.
- In AP3 „Experimentelle, theoretische und numerische Untersuchungen“ sollten große Versuchskörper gemäß den Planungen der Partner IMB TU Dresden und IMB RWTH Aachen hergestellt und zur Prüfung an die Vorhabenpartner geliefert werden.
- In AP4 „Allgemeingültige Regelungen“ wird die Praxistauglichkeit der Nachweise im GZG, der allgemeinen Bewehrungsregeln und der Regelungen zur baulichen Durchbildung überprüft.

2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Hentschke Bau bringt nicht nur seine Expertise zur Vorfertigung von Betonbauteilen ein, sondern kann bereits durch Mitarbeit in Forschungsprojekten Erfahrungen im Einsatz von Carbonbewehrung vorweisen [Bie20b; Boc17; Boc18; Bra16; Fre14; Häu19; Jes19; Jes10; Sch20a; Tie18]. Der ZE besitzt bereits Erfahrungen auf dem Gebiet der Herstellung von kleinformatigen ebenen und räumlichen Carbonbetonfertigteilen sowie in begrenztem Umfang für großformatige Carbonfertigteile (im Fertigteilwerk und in Ortbeton) und soll diese im Rahmen des Teilvorhabens einfließen lassen. Mit Hilfe des in der Fertigteilherstellung erfahrenen Personals wird die Herstellung unter industriellen Randbedingungen ausgeführt.

Während der Antragstellung wurde angenommen, dass die in früheren Forschungsarbeiten gewonnen Erkenntnisse eine hinreichende Arbeitsbasis für die geplanten Arbeiten darstellen.

3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Alle Arbeitspakete der Hentschke Bau GmbH wurden vollständig innerhalb der Projektlaufzeit bearbeitet. Bei der Herstellung der carbonbetonverstärkten Stahlbetonbauteile kam es zu Verzögerungen, da die Detailplanung beim Vorhabenpartner mehr Zeit in Anspruch nahm als ursprünglich geplant. Eine Verlängerung der Projektlaufzeit war nicht erforderlich. Alle Arbeiten konnten innerhalb der Projektlaufzeit erledigt werden.

4. Wissenschaftlicher und technischer Stand (an den angeknüpft wurde)

Angabe bekannter Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte, die für die Durchführung des Vorhabens benutzt wurden

Bisherige Untersuchungen zu Nachweiskonzepten für Carbonbeton fokussierten überwiegend den Grenzzustand der Tragfähigkeit (GZT) mit dem Nachweis der Biege- [Kad19; Häu19; Kap19; Mül20; Pre19; Rem15; Rem20], der Zug- [Bra16; Hin17; Rem17; Sch18; Spe19b; Val20; Wag20] und der Querkrafttragfähigkeit [Bie19a; Bie19b; Her17; May19] sowie einer ausreichenden Endverankerung der Biegezugbewehrung [Bie18b; Lor14; Wag19; Wag18]. Auch das Tragverhalten unter Druck und Torsion wurde untersucht [Ala18; Ala17; Boc19; Boc17; Sch11]. Während die Biege- und Zugtragfähigkeit umfassend erforscht wurden, sind Fragen zur Querkrafttragfähigkeit und dem Verbundverhalten im GZT (Verankerung, Übergreifung) teilweise noch unbeantwortet. Auch der Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (GZG) wurde bisher nicht ausreichend betrachtet. Erste Untersuchungen zur Verformung und Rissentwicklung von Carbonbetonbauteilen sind [Gha20] zu entnehmen, jedoch war der GZG nicht Bestandteil der Arbeit, sodass hier weiterer Forschungsbedarf bestand. Da das Verbundverhalten die Rissentwicklung und Durchbiegung im GZG maßgebend beeinflusst, waren hierzu weitere Untersuchungen erforderlich.

Bereits in den Sonderforschungsbereichen 528 und 532 [Ban04; Ban06; Lor09; Lor11] wurde das Verbundverhalten von nichtmetallischen Bewehrungen untersucht. Im Rahmen der durch das BMBF geförderten Verbundvorhaben C3-B3 „Konstruktion, Bemessung, Prüfung“ [Cur16; Sch18] und C3-V1.2 „Nachweis- und Prüfkonzepte für Normen und Zulassungen“ [Bie18a; Bie17; Bie18c; Bie18b; Li18; Sch20b; Wag19; Wag18; Wag20] wurden Prüf- und Auswertemethoden [Alf19; Bie19c; Lor14] entwickelt, die zum Teil in die Empfehlungen für Prüfverfahren (Teil 4) der DAfStb-Richtlinie NMB [DAfStb24] übernommen wurden. Bei der Verankerung der Bewehrung lag der Fokus auf den erforderlichen Verankerungslängen, die zu einem Reißen der Bewehrung führen (GZT). Für eine allgemeine baupraktische Anwendung ist aber auch das Verhalten bis zum Erreichen der maximalen Tragfähigkeit und somit das belastungsabhängige Verbundverhalten von Bedeutung. Weil entsprechende Reihenuntersuchungen fehlen, war eine allgemeine Beschreibung des Verbundverhaltens noch nicht möglich. Entsprechend konnte Nachweisverfahren sowie praxistaugliche und belastbare Regelungen für Betonbauteile mit nichtmetallischer Bewehrung im GZG aktuell nicht hergeleitet und zur Verfügung gestellt werden.

Auch die notwendige Begrenzung von Rissbreiten wurde wegen der korrosionsbeständigen Bewehrung bislang nur unzureichend untersucht. Dabei ist die Sicherstellung der Anforderungen an die Ästhetik und die Funktionalität von grundlegender Bedeutung. Weiterhin beeinflusst die Rissentwicklung unter Gebrauchslast die Steifigkeitsentwicklung und damit das Verformungsverhalten eines Bauteils. Eine rechnerische Begrenzung der Rissbreite erfolgte bis zur Veröffentlichung der DAfStb-Richtlinie in Praxisanwendungen nicht. Allenfalls wurde eine konstruktive Bewehrung angeordnet. Hinzu kommt, dass das im Grenzzustand der Tragfähigkeit ermittelte Verbundverhalten nicht ohne weiteres auf den Grenzzustand der

Gebrauchstauglichkeit übertragbar ist, da die Lasteinleitungslängen und die Verbundspannungsverteilung vom Lastniveau beeinflusst werden [Li18].

Aktuell verfügbare Messtechniken ermöglichen die Aufzeichnung des Dehnungsverhaltens von Bewehrungselementen, der Rissentstehung und Rissentwicklung sowie der Durchbiegung. Zu den innovativen Messsystemen zählen die faseroptische Sensorik [Sch16; Spe19a], Ultraschall [Mül17], akustische Emission [Sod19] und moderne Auswertemethoden, z. B. die Digitale Fotogrammmetrie [Str18; Ver19] oder numerische Auswertetools, sowie das am Massivbauinstitut der RWTH Aachen University entwickelte Crack-Detection-Tool [Li16]. Durch kontinuierliche Messungen entlang der nichtmetallischen Bewehrungen (z. B. mittels verteilter faseroptischer Sensorik), kann das Verbundverhalten analysiert und beschrieben sowie Ansätze zur Bemessung von Verankerungslängen und Übergreifungsstößen hergeleitet werden [Bec25; Jan23; Sch25a].

verwendete Fachliteratur sowie benutzte Informations- und Dokumentationsdienste

[Ala17] Alabdulhady, M. Y.; Sneed, L. H.; Carloni, C.: Torsional behavior of RC beams strengthened with PBO-FRCM composite – An experimental study, in: Engineering Structures 136, (2017), S. 393–405.

[Ala18] Alabdulhady, M. Y.: Torsional behavior of RC beams strengthened with PBO-FRCM composite. Dissertation. Missouri University of Science and Technology, Missouri, (2018).

[Alf19] Alfes, C.; Ignatiadis, A.: Zwanzig20 – Carbon Concrete Composite – C3-V1.2 Nachweis- und Prüfkonzepte für Normen und Zulassungen – Schlussbericht Teilvorhaben V1.2-II. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Berlin, (2019).

[Ban04] Banholzer, B.: Bond Behaviour of a Multi-Filament Yarn Embedded in a Cementitious Matrix; 1. Aufl. Dissertation. RWTH Aachen University, Aachen, (2004).

[Ban06] Banholzer, B.; Brockmann, T.; Brameshuber, W.: Material and bonding characteristics for dimensioning and modelling of textile reinforced concrete (TRC) elements, in: Materials and Structures 39 (8), (2006), S. 749–763.

[Bec25] Becks, H.; Högemann, M.; Hegger, J.; Classen, M.: Assessing crack formation and strain distribution in concrete structures using externally installed fiber optic sensors, in: Case Studies in Construction Materials (22), (2025).

[Bie17] Bielak, J.; Hegger, J.; Chudoba, R.: Towards Standardization: Testing and Design of Carbon Concrete Composites, in: Hordijk, D. A.; Luković, M. (Hrsg.): High Tech Concrete: Where Technology and Engineering Meet: Proceedings of the 2017 fib Symposium. fib Symposium 2017, Maastricht, Netherlands, (2017), S. 313–320.

[Bie18a] Bielak, J.; Hegger, J.: Schalentragwerke aus Spritzbeton mit textiler Bewehrung: aktuelle Entwicklungen bei Bemessungs-, Herstell- und Prüfmethodik, in: Kusterle, W. (Hrsg.): Proceedings der Spritzbeton Tage 2018. Spritzbeton-Tagung 2018, Alpbach, (2018).

[Bie18b] Bielak, J.; Spelter, A.; Will, N.; Claßen, M.: Verankerungsverhalten textiler Bewehrungen in dünnen Betonbauteilen, in: Beton- und Stahlbetonbau 113 (7), (2018), S. 515–524.

[Bie18c] Bielak, J.; Li, Y.; Hegger, J.; Chudoba, R.: Characterization procedure for bond, anchorage and strain-hardening behavior of textile-reinforced cementitious composites, in: Proceedings of The Eighteenth International Conference of Experimental Mechanics. ICEM 18, Brussels, (2018).

[Bie19a] Bielak, J.; Adam, V.; Hegger, J.; Classen, M.: Shear Capacity of Textile-Reinforced Concrete Slabs without Shear Reinforcement, in: Applied Sciences 9 (7), (2019).

[Bie19b] Bielak, J.; Bergmann, S.; Hegger, J.: Querkrafttragfähigkeit von Carbonbeton-Plattenbrücken mit C-förmiger Querkraftbewehrung, in: Beton- und Stahlbetonbau 114 (5), (2019), S. 465–475.

[Bie19c] Bielak, J.; Heiermann, T.; Will, N.; Hegger, J.; Raupach, M.: Zwanzig20 – Carbon Concrete Composite – C3-V1.2 Nachweis- und Prüfkonzepte für Normen und Zulassungen – Schlussbericht Teilvorhaben V1.2-III, Nr. 424/2019, Lehrstuhl und Institut für Massivbau; Institut für Baustoffforschung (ibac). RWTH Aachen University, Aachen, (2019).

[Bie20b] Bielak, J.; Schmidt, M.; Hegger, J.; Jesse, F.: Structural Behavior of Large-Scale I-Beams with Combined Textile and CFRP Reinforcement, in: Applied Sciences 10 (13), (2020).

[Boc17] Bochmann, J.; Curbach, M.; Jesse, F.: Carbonbeton unter einaxialer Druckbeanspruchung: Ergebnisse systematischer experimenteller Untersuchungen, in: Beton- und Stahlbetonbau 112 (5), (2017), S. 293–302.

[Boc18] Bochmann, J.; Curbach, M.; Jesse, F.: Carbonbeton unter Druck: Teil 2: Einfluss von Bewehrungsgeometrie und -anordnung, in: Beton- und Stahlbetonbau 113 (1),(2018), S. 22–32.

[Boc19] Bochmann, J.: Carbonbeton unter einaxialer Druckbeanspruchung. Dissertation, Institut für Massivbau. TU Dresden, Dresden, (2019).

[Bra16] Brameshuber, W.; Hinzen, M.; Dubey, A.; Peled, A.; Mobasher, B.; Bentur, A.; Aldea, C.; Silva, F. d. A.; Hegger, J.; Gries, T.; Wastiels, J.; Malaga, K.; Papanicolaou, C.; Taerwe, L.; Curbach, M.; Mechtcherine, V.; Naaman, A.; Orlowsky, J.; Hamelin, P.; Reinhardt, H.-W.; Shah, S.; Toledo, R.; Triantafillou, T.; Larbi, A.; Garcia, D.; Garmendia, L.; Gopinath, S.; Jesse, F.: Recommendation of RILEM TC 232-TDT: Test methods and design of textile reinforced concrete – Uniaxial tensile test: test method to determine the load bearing behavior of tensile specimens made of textile reinforced concrete, in: Materials and Structures 49 (12),(2016), S. 4923–4927.

[Cur16] Curbach, M.: Schlussbericht C3-B3-I-a Entwicklung von Bemessungs- und Sicherheitskonzepten sowie standardisierter Prüfkonzepte zur Materialcharakterisierung von Carbonbeton. TU Dresden, (2016).

[DAfStb24] DAfStb-Richtlinie Betonbauteile mit nichtmetallischer Bewehrung, DIN Media, Berlin (2024).

[Fre14] Frenzel, M.; Lieboldt, M.; Curbach, M.: Leicht Bauen mit Beton: Balkonplatten mit Carbonbewehrung, in: Beton- und Stahlbetonbau 109 (10), (2014), S. 713–725.

[Gha20] El-Ghadioui, R.: Bemessung carbonbewehrter Betonbauteile unter besonderer Betrachtung des Gebrauchszustandes: Entwicklung eines Modells zur wirklichkeitsnahen Verformungsberechnung. Dissertation, Institut für Massivbau. TU Darmstadt, Darmstadt, (2020).

[Häu19] Häußler-Combe, U.; Weselek, J.; Jesse, F.: A Safety Concept for Non-Metallic Reinforcement for Concrete under Bending, in: Structural Journal 116 (1), (2019), S. 151–160.

[Her17] Herbrand, M.; Adam, V.; Classen, M.; Kueres, D.; Hegger, J.: Strengthening of Existing Bridge Structures for Shear and Bending with Carbon Textile-Reinforced Mortar, in: Materials 10 (9), (2017), S. 1099.

[Hin17] Hinzen, M.: Prüfmethode zur Ermittlung des Zugtragverhaltens von textiler Bewehrung für Beton, in: Bauingenieur 92 (6), (2017), S. 289–291.

[Jan23] Janiak, T.; Becks, H.; Camps, B.; Classen, M.; Hegger, J.: Evaluation of distributed fibre optic sensors in structural concrete, in: Materials and Structures 56 (159), (2023).

[Jes10] Jesse, F.; Curbach, M.: Verstärken mit Textilbeton, in: Bergmeister, K.; Fingerloos, F.; Wörner, J.-D. (Hrsg.): Beton-Kalender 2010: Brücken - Betonbau im Wasser. 99. Jahrgang Aufl., Ernst & Sohn, Berlin, (2010), 457-565.

[Jes19] Jesse, F.; Apitz, A.; Schlaich, M.: Dauerhafte und wirtschaftliche Straßenbrücken mit Halbfertigteilen aus vorgespanntem Carbonbeton, in: Curbach, M. (Hrsg.): 29. Dresdner Brückenbausymposium: Planung, Bauausführung, Instandsetzung und Ertüchtigung von Brücken. 29. Dresdner Brückenbausymposium, Dresden, Deutschland, (2019), 173-183.

[Li16] Li, Y.; Scholzen, A.; Chudoba, R.; Hegger, J.: Experimental and Numerical Methods for Characterization of The Tensile Behavior of Textile Reinforced Concrete, in: IABSE Conference, Guangzhou 2016: Bridges and Structures Sustainability - Seeking Intelligent Solutions. IABSE Conference, Guangzhou 2016: Bridges and Structures Sustainability - Seeking Intelligent Solutions, Guangzhou, China (People's Republic), (2016), S. 646–653.

[Li18] Li, Y.; Bielak, J.; Hegger, J.; Chudoba, R.: An incremental inverse analysis procedure for identification of bond-slip laws in composites applied to textile reinforced concrete, in: Composites Part B: Engineering 137, (2018), S. 111–122.

[Lor09] Lorenz, E.; Ortlepp, R.: Berechnungsalgorithmus zur Bestimmung der Verankerungslänge der textilen Bewehrung in der Feinbetonmatrix, in: Curbach, M.; Jesse, F. (Hrsg.): Textilbeton – Theorie und Praxis: Tagungsband zum 4. Kolloquium zu textilbewehrten Tragwerken (CTRS4) und zur 1. Anwendertagung. CTRS4, Dresden, (2009), S. 491–502.

[Lor11] Lorenz, E.; Ortlepp, R.: Untersuchungen zur Bestimmung der Übergreifungslängen textiler Bewehrungen aus Carbon in Textilbeton (TRC), in: Curbach, M.; Ortlepp, R. (Hrsg.): Textilbeton in Theorie und Praxis: 6. Kolloquium zu textilbewehrten Tragwerken (CTRS6). 6th Colloquium on Textile Reinforced Structures, Berlin, (2011), S. 85–102.

[Lor14] Lorenz, E.: Endverankerung und Übergreifung textiler Bewehrungen in Betonmatrices. Dissertation, Institut für Massivbau. TU Dresden, Dresden, (2014).

[May19] May, S.; Schumann, A.; Bergmann, S.; Curbach, M.; Hegger, J.: Shear Strengthening of Reinforced Structures with Carbon Reinforced Concrete, in: Derkowski, W.; Gwozdziewicz, P.; Hojdys, L.; Krajewski, P.; Pantak, M. (Hrsg.): Concrete - Innovations in Materials, Design and Structures: Proceedings of the 2019 fib Symposium. fib Symposium 2019, Krakow, Poland, (2019), S. 1563–1570.

[Mül17] Müller, M.; Herbrand, M.; Niederleithinger, E.: Monitoring von Querkraftversuchen an Spannbetondurchlaufträgern mit Ultraschall und Codawelleninterferometrie/Monitoring of shear tests on prestressed concrete continuous beams using ultrasound and coda wave interferometry, in: Bauingenieur 92 (11), (2017), S. 474–481.

[Rem17] Rempel, S.; Ricker, M.: Ermittlung der Materialkennwerte der Bewehrung für die Bemessung von textilbewehrten Bauteilen, in: Bauingenieur 92 (6), (2017), S. 280–288.

[Sch11] Schladitz, F.: Torsionstragverhalten von textilbetonverstärkten Stahlbetonbauteilen. Dissertation. TU Dresden, Dresden, (2011).

[Sch16] Schmidt-Thrö, G.; Scheufler, W.; Fischer, O.: Kontinuierliche faseroptische Dehnungsmessung im Stahlbetonbau, in: Beton- und Stahlbetonbau 111 (8), (2016), S. 496–504.

[Sch18] Schütze, E.; Bielak, J.; Scheerer, S.; Hegger, J.; Curbach, M.: Einaxialer Zugversuch für Carbonbeton mit textiler Bewehrung, in: Beton- und Stahlbetonbau 113 (1), (2018), S. 33–47.

[Sch20a] Schlaich, M.; Apitz, A.; Jesse, F.: Brücken aus vorgespanntem Carbonbeton, in: Beton- und Stahlbetonbau 115 (9), (2020), S. 684–696.

[Sch20b] Schumann, A.: Experimentelle Untersuchungen des Verbundverhaltens von Carbonstäben in Betonmatrices. Dissertation, Institut für Massivbau. TU Dresden, Dresden, (2020).

[Sch25a] Schmidt, C.; Hegger, J.: Experimental investigations on bond behaviour and crack development in concrete members reinforced with carbon textile grids subjected to cyclic loading, in: Construction and Building Materials 466, (2025), S. 140-168.

[Sod19] Sodeikat, C.; Groschup, R.; Knab, F.; Obermeier, P.: Acoustic Emission in der Bauwerksüberwachung zur Feststellung von Spannstahlbrüchen, in: Beton- und Stahlbetonbau 114 (10), (2019), S. 707–723.

[Spe19a] Speck, K.; Vogdt, F.; Curbach, M.; Petryna, Y.: Faseroptische Sensoren zur kontinuierlichen Dehnungsmessung im Beton, in: Beton- und Stahlbetonbau 114 (3), (2019), S. 160–167.

[Spe19b] Spelter, A.; Bergmann, S.; Bielak, J.; Hegger, J.: Long-Term Durability of Carbon-Reinforced Concrete: An Overview and Experimental Investigations, in: Applied Sciences 9 (8), (2019).

[Str18] Strauss, A.; Castillo, P.; Bergmeister, K.; Krug, B.; Wan-Wendner, R.; Marcon, M.; Matos, J.; Casas, J. R.: Shear Performance Mechanism Description Using Digital Image Correlation, in: Structural Engineering International 28 (3), (2018), S. 338–346.

[Tie18] Tietze, M.; Rittner, S.; Kahnt, A.; Zuben, M. von; Grauer, O.; Schurig, M.: Automatisierte und bedarfsgerechte Carbonbewehrungsherstellung im Fertigteilwerk, in: Betonwerk + Fertigteil-Technik 21 (1), (2018), S. 192–197.

[Val20] Valeri, P.; Fernàndez Ruiz, M.; Muttoni, A.: Tensile response of textile reinforced concrete, in: Construction and Building Materials 258, (2020), First Published Online.

[Ver19] Vervloet, J.; Tysmans, T.; El Kadi, M.; Munck, M. de; Kapsalis, P.; Van Itterbeeck, P.; Wastiels, J.; van Hemelrijck, D.: Validation of a Numerical Bending Model for Sandwich Beams with Textile-Reinforced Cement Faces by Means of Digital Image Correlation, in: Applied Sciences 9 (6),(2019), S. 1253.

[Wag18] Wagner, J.; Holz, K.; Curbach, M.: Zyklische Verbundversuche mit Carbonbeton: Ein Vergleich verschiedener Versuchsaufbauten, in: Beton- und Stahlbetonbau 113 (03), (2018), S. 525–534.

[Wag19] Wagner, J.; Curbach, M.: Bond Fatigue of TRC with Epoxy Impregnated Carbon Textiles, in: Applied Sciences 9 (10), (2019), S. 1980.

[Wag20] Wagner, J.; Spelter, A.; Hegger, J.; Curbach, M.: Ermüdungsverhalten von Carbonbeton unter Zugschwellbelastung, in: Beton- und Stahlbetonbau 115 (9),(2020), 710-719.

[FprEN] FprEN 1992-1-1/2023-04: Eurocode 2: Design of Concrete Structures - Part 1-1: General rules for buildings, bridges and civil engineering structures, Formal Vote version by Project Team SC2,(2023).

5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Die Zusammenarbeit der Projektpartner wurde durch regelmäßige Arbeits- und Verbundtreffen mit dem Austausch von Ergebnissen sowie Absprachen zur Versuchsplanung, -durchführung und -auswertung sichergestellt. Eine besonders enge und intensive Zusammenarbeit fand mit folgenden Vorhabenpartnern statt:

- Technische Universität Dresden (TUD), Institut für Massivbau
- Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule (RWTH) Aachen, Lehrstuhl und Institut für Massivbau

Eines der zentralen und praxisrelevantesten Ergebnisse aus dem Projekt „CRC-BoDeM“ ist die Einbindung von Erkenntnissen in die neu erstellte und inzwischen veröffentlichte Richtlinie „Betonbauteile mit nichtmetallischer Bewehrung“ des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton

(DAfStb) [DAfStb24], in die noch in Bearbeitung befindliche DAfStb Richtlinie „Verstärken von Betonbauteilen“. Zudem wird aktuell intensiv an der 2. Fassung der DAfStb Richtlinie „Betonbauteile mit nichtmetallischer Bewehrung“ mit erweitertem Anwendungsgebiet und Regelungen gearbeitet. Auch dort werden die Erkenntnisse des ZE in regelmäßigen Sitzungen der Arbeitsgruppen und des gesamten Unterausschusses „Nichtmetallische Bewehrung“ eingebracht. Die Überführung der Erkenntnisse in eine Richtlinie bzw. Norm stellt einen der höchsten Transfergrade dar, da durch die Richtlinie die Anwendbarkeit der Ergebnisse für alle Beteiligten im Bauwesen geregelt ist.

Die Kooperation mit allen beteiligten Partnern in den Teilprojekten verlief durchgehend konstruktiv und eng abgestimmt. Der fortlaufende Dialog über Erfahrungen, Fachkenntnisse und Lösungswege war ein zentrales Prinzip der Teilvorhaben, um die vorgesehenen Resultate im gemeinsamen inhaltlichen Diskurs über die gesamte Laufzeit hinweg zu entwickeln. Die Schnittstellen sowie die Verknüpfungsstrukturen der einzelnen Projektaufgaben wurden übereinstimmend sowohl in der Gesamtkonzeption des Verbundvorhabens als auch in der vertraglich geregelten Zusammenarbeit definiert. Die Zusammenarbeit der Projektpartner wurde durch regelmäßige Arbeits- und Verbundtreffen mit dem Austausch von Ergebnissen sowie Absprachen zur Versuchsplanung, -durchführung und -auswertung sichergestellt.

II. Eingehende Darstellung

1. Verwendung der Zuwendung und der erzielten Ergebnisse im Einzelnen (mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele)

Die nachfolgende Darstellung ordnet die durchgeführten Arbeiten den ursprünglich geplanten Aktivitäten zu.

Ziel: Standardisierte Herstellungsverfahren im Fertigteilwerk. (Aktivität 1.2.6)

Ermittlung der ausführungstechnischen Anforderungen an allgemeine Bewehrungsregeln und die bauliche Durchbildung zur Sicherstellung der Praxistauglichkeit.

Ergebnis:

Aus dem Herstellungsprozess im Fertigteilwerk ergeben sich besondere Anforderungen an die allgemeinen Bewehrungsregeln und die bauliche Durchbildung. Die Vorgaben müssen in der Praxis einfach umzusetzen sein und eine wirtschaftliche Fertigung erlauben. Die Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

1. Die Bestrebungen zu extrem dünnen Carbonbetonbauteilen bzw. extrem dünnen Verstärkungsschichten aus Carbonbeton führen ggf. in der Ausführung zu erhöhten Anforderungen an Ausführungstoleranzen, z.B. hinsichtlich Toleranzen der Lagegenauigkeit der Bewehrung, der Betondeckung und der Bauteildicken. Dies ist i.d.R. mit erhöhtem Aufwand in der Fertigung verbunden, was stets die Frage nach einer wirtschaftlichen Fertigung aufwirft. Es wird empfohlen, Anforderungen an die Toleranzen in der Bauausführung auf ein Maß zu beschränken, dass mit üblichen Aufwendungen zielsicher erreicht werden kann.

2. Allgemeine Bewehrungsregeln und die bauliche Durchbildung müssen die Besonderheiten verschiedener Formen nichtmetallischer Bewehrungen berücksichtigen, z.B. Formbewehrungen aus flächigen textilen Strukturen und die in den Herstellverfahren tatsächlich erreichbaren Toleranzen. Z.B. ist bei nichtmetallischen Stab- oder Flächenbewehrungen wegen der geringeren Biegesteifigkeit mit erhöhtem Aufwand zur Lagesicherung zu rechnen. Bei Formbewehrungen hingegen können auch höhere Anforderungen an die

Lagegenauigkeit oder die Betondeckung ohne erhöhte Aufwendungen erreicht werden, wenn die Formbewehrungen eine höhere Steifigkeit und Herstellgenauigkeit aufweisen, was in der Praxis in vielen Anwendungsfällen zutrifft.

3. Die Art und Weise der Herstellung sollte nicht unbedingt im Planungsprozess detailliert festgelegt werden, sondern – wie auch bisher im Betonbau üblich – durch die Ausführung im Rahmen vorliegender Kompetenzen, Erfahrungen und verfügbarer Geräte und eingesetzter Technologie festgelegt werden. I.d.R. kann nicht davon ausgegangen werden, dass Planer die notwendige Erfahrung haben, um die Ausführungstechnologie im Detail festzulegen. Wichtig ist die eindeutige Angabe spezieller, über das Übliche hinausgehender Anforderungen an den Ausführungsprozess. Im Sinne einer wirtschaftlichen Herstellung sollten höhere Anforderungen als allgemein im Betonbau üblich nur in besonders begründeten Anwendungsfällen in Betracht gezogen werden.

Ziel: Herstellung von großformatigen Versuchskörpern (Carbonbeton/Stahlbeton). (Aktivität 3.1.6)

Für die Herleitung der Nachweise im GZG, allgemeine Bewehrungsregeln und baulichen Durchbildung von Carbonbetonbauteilen und carbonbetonverstärkten Stahlbetonbauteilen sind experimentelle Untersuchungen an großformatigen Versuchskörpern erforderlich, die durch den ZE herzustellen waren.

Ergebnis:

Es wurden insgesamt 36 Großkörper mit verschiedenen Bewehrungen und Betonsorten hergestellt und an den Vorhabenpartner TU Dresden geliefert. Besonderheit ist eine umfangreiche Ausstattung der Probekörper mit Sensorik. Bestimmte Positionen der Betonstahlbewehrung wurden durch den Vorhabenpartner TU Dresden mit Dehnmesstreifen und verteilten optischen Sensoren ausgerüstet und waren mit besonderer Sorgfalt in die Bewehrungskörper zu integrieren. Darüber hinaus waren durch den ZE weitere verteilte optische Sensoren direkt in den Bewehrungskorb einzubauen und während aller Teilschritte der Herstellung und des Transportes zum Vorhabenpartner so zu schützen und zu sichern, dass keine Beschädigungen der empfindlichen Sensoren auftraten. Die Herstellung erfolgte stehend in einer projektspezifisch erstellten Batterieschalung, um möglichst homogene Betonqualitäten zu erreichen.

Für das Vorhaben wurde entsprechend der Anforderungen des Projektpartners eine spezielle Betonrezeptur der Festigkeitsklasse C20/25 entwickelt. Gegenüber üblichen Anforderungen im Fertigteilwerk war hier die Zielfestigkeit auf ein enges Fenster beschränkt, eine Druckfestigkeit von f_cm,cube,28d = 33 N/mm2 sollte keinesfalls überschritten werden. Da die Oberflächenrauigkeit für die nachfolgende Verstärkung mittels Oberflächenverzögerer hergestellt werden sollte, musste für das Entschalten und Waschen der Bauteiloberfläche eine Zielfestigkeit von ca. 21,5 N/mm2 sichergestellt werden. Dazu wurde das Reifegradverfahren nach de Vree angewendet. Je nach Umgebungstemperaturen wurde die Zielfestigkeit nachweislich nach 8,3 h (Grundkörper aus C50/60) und 6,8 d (Grundkörper aus C20/25 in Verbindung mit kühler Witterung) erreicht.

Hier beispielhaft: Plan PK1 und Fotos aus dem Herstellprozess:

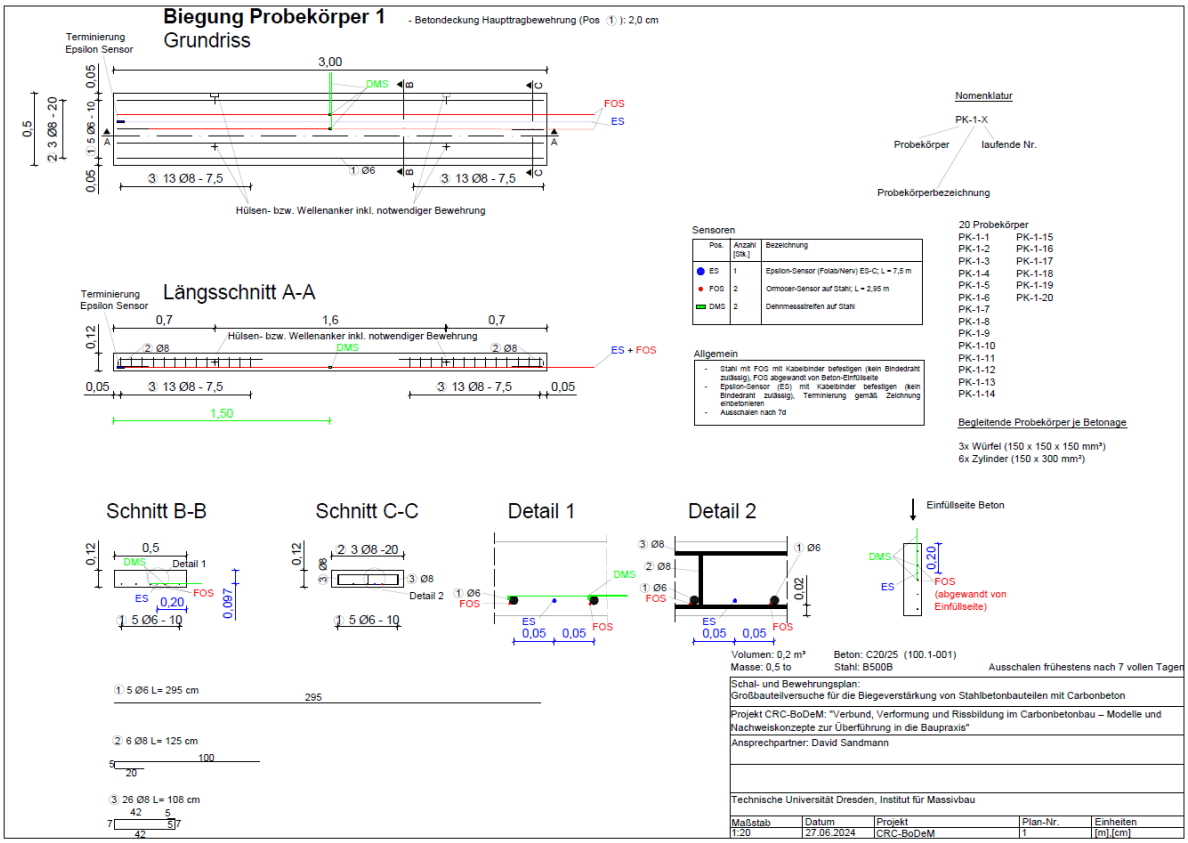


Bild 2: Plan des Großkörpers PK1 mit farbigem Eintrag der einzubauenden Sensorik

Bild 3: gefertigter Bewehrungskorb mit DMS und verteilten optischen Sensoren

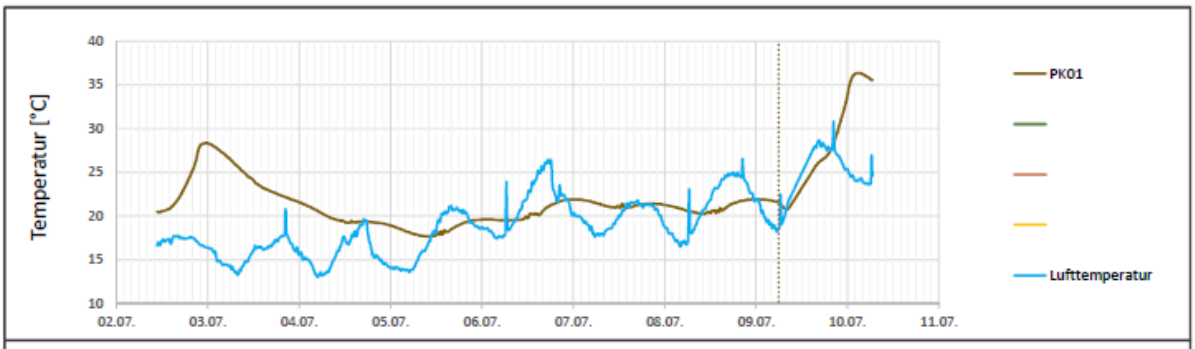
Bild 4: Detail mit verteiltem optischen Sensor mit Terminierung (ca. d = 2 mm)

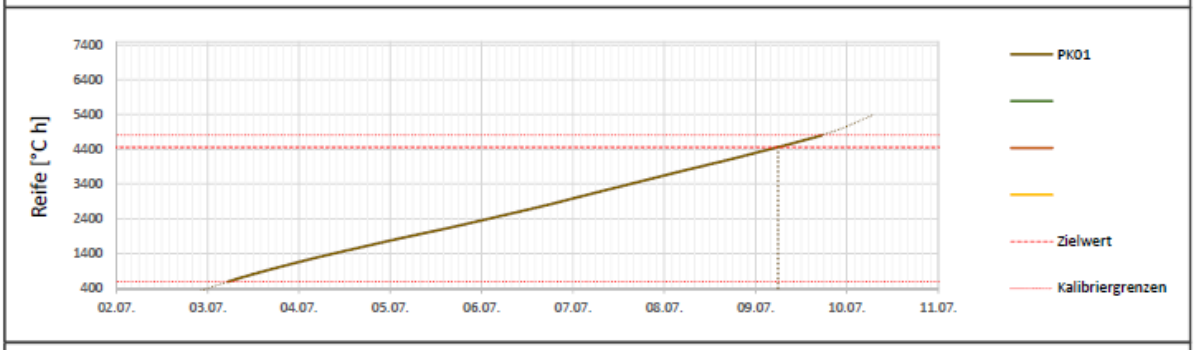
Protokoll Reifegradprüfung

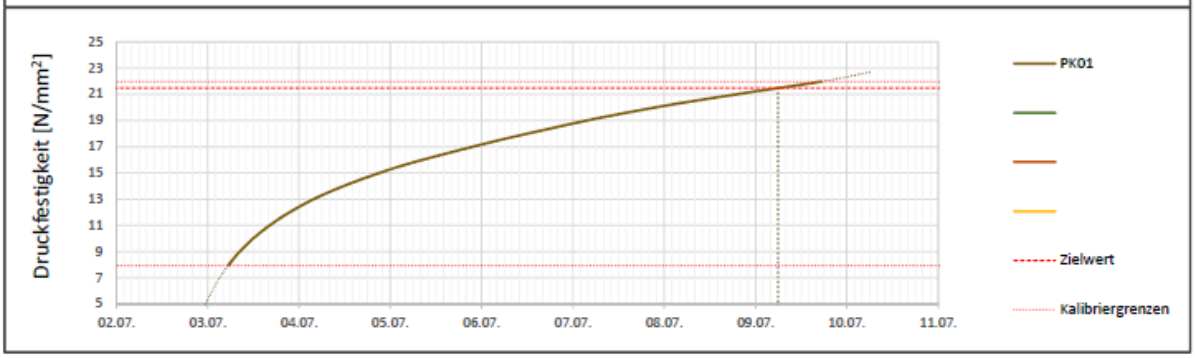
hentschke

Projektdaten	Kunde		Projekt	Nr.	Bauteile		
	TUD, Insitut für Massivbau		CRC-BoDeM	50-999-036	PK01, PK01, PK02, PK04		
Betondaten	Betonsorte		Druckfestigkeitsklasse		Zielwert	Würfelfestigkeit beim Entschalen	
	Hentschke FTW 201.1		C 25/30		21,5 N/mm2	-	
Messdaten			Beginn der Messung		Ende der Messung		Länge der Messung
			02.07.2024 10:38		10.07.2024 06:33		7,8 d

Messposition	T_1h nach Schüttung	T_mittel	T_max	Zeit bis max	T bei Ziel	Festigkeit bei Messende	Zeitpunkt Zielwert erreicht	Zeit bis Zielwert
	°C	°C	°C	h	°C	N/mm²		
Lufttemperatur	16,9	19,2	30,8	-	-		-	-
PK01	20,5	22,1	36,4	184,4	21,6	22,8	09.07.2024 05:54	6,8 d







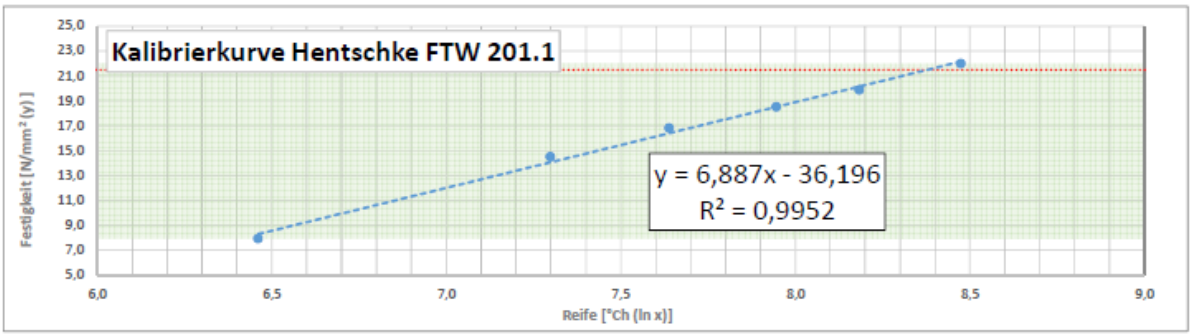


Bild 5: Protokoll der Reifegradprüfung des Probekörpers PK01

Bild 5: Vorversuch zur Festlegung der Zielfestigkeit für das Erreichen der vorgegebenen Oberflächenrauigkeit für die nachfolgende Bauteilverstärkung mittels Verzögerer

Alle seitens der Vorhabenpartner benötigten Probekörper wurden hergestellt und für die geplanten Untersuchungen an die Vorhabenpartner ausgeliefert.

Ziel: Anforderungen an standardisierte Herstellungsverfahren im Fertigteilwerk (Aktivität 4.2.4)

Die Praxistauglichkeit der Nachweise im GZG, der allgemeinen Bewehrungsregeln und der Regeln zur baulichen Durchbildung waren aus Sicht der Bauteilherstellung zu überprüfen.

Ergebnis:

Die von den Vorhabenpartnern erarbeiteten Nachweise im GZG, allgemeinen Bewehrungsregeln und Regeln zur baulichen Durchbildung wurden geprüft und werden weitgehend als praxistauglich eingeschätzt. Im Wesentlichen wurden dabei die Regeln der DIN EN 1992 für nichtmetallische Bewehrungen angepasst. Offen ist derzeit, ob diese Regeln in der Baupraxis tatsächlich uneingeschränkt angewendet werden können. Das Beispiel einer 40 mm dünnen Fassadenplatte mit Nachweis der Rissefreiheit und Rissbreitenbeschränkung zeigt offene Fragestellungen, z.B.:

1. Für die Eiwirkungen infolge Wind wurden die Druckbeiwerte c_pe für windundurchlässige Baukörper verwendet. Diese können die Einwirkungen auf vorgehängte hinterlüftete Fassaden prinzipbedingt nicht korrekt abbilden, da die Luftströmungen im Hinterlüftungsraum nicht betrachtet werden.
2. Inwieweit ist der Nachweis der Rissefreiheit auf Basis f_ctk,fl geeignet, die erwartete Rissefreiheit von Fassadenelementen tatsächlich nachzuweisen? In der vorgeschlagenen Form werden nur Einwirkungen aus Wind und Eigengewicht berücksichtigt. Einflüsse aus Temperatur auf der Einwirkungsseite und die Wirkungen von witterungsbedingten Eigenspannungen (hygrisch und thermisch bedingt) auf der Widerstandsseite bleiben unberücksichtigt. Risse in den Fassadenelementen dürften deshalb häufiger auftreten, als es dem 5-%-Fraktil von f_ctk,fl nach zu erwarten ist.
3. Sehr schlanke Bauteile zeigen nach Rissbildung einen erheblichen Verformungszuwachs. Derzeit ist nicht geplant, Verformungen im GZG zu überprüfen,

auch wenn der Nachweis der Rissefreiheit die tatsächliche Rissefreiheit nicht zielsicher bewerten kann, siehe vorhergehender Listeneintrag. Fraglich ist auch, ob die verwendete Zielgröße w_k = 0,4 mm in der Praxis anwendbar ist, da derartige Risse aufgrund witterungs- und verschmutzungsbedingter Verfärbungen der Risse nach den Erfahrungen des ZE nicht akzeptabel sind.

Prinzipiell ist diese Fragestellung nicht spezifisch für Bauteile mit nichtmetallischer Bewehrung, sondern für bestimmte Anwendungsfälle, hier interlüftete Fassaden bzw. extrem schlanke Fassadenelemente. Untersuchungen zur Einwirkungsseite bzw. Sonderfälle der Anwendung waren jedoch nicht Teil des Vorhabens.

2. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Siehe separaten zahlenmäßigen Nachweis.

3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die durchgeführten Arbeiten sind von hohem Interesse für die grundsätzlichen Fragestellungen in der Bemessung von Carbonbetonbauteilen für den Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (GZG). Während die Vorteile der Carbonbetonbauweise in Hinblick auf die Tragfähigkeit (GZT) bekannt sind und dadurch die Bauweise eine Alternative zum herkömmlichen Stahlbeton bereitstellt, fehlt es aufgrund der konservativen Auslegung der Nachweise im GZG an einer flächendeckenden Umsetzung von Bauprojekten mit nichtmetallischer Bewehrung.

Die umfangreichen und notwendigen Arbeiten und die gewonnenen Erkenntnisse dieses Forschungsvorhabens, gerade in Hinblick auf die Nachweise im GZG und die konstruktive Durchbildung, tragen zu einer besseren Anwendbarkeit der Bauweise bei. Dazu waren die durchgeführten Arbeiten, insbesondere die umfassenden experimentellen Versuchsreihen unter Nutzung moderner Messtechnik, wie beispielsweise verteilte faseroptischer Sensorik, notwendig und angemessen zum Erreichen der im Antrag gesetzten Ziele. Das erforderliche und eingesetzte Personal sowie die erforderlichen Personenmonate waren in Hinblick der geleisteten Arbeiten notwendig und angemessen. Dies betrifft ebenso die Materialkosten.

Das Wissen zu nichtmetallischen Bewehrungen wurde bereits in die 1. Fassung der Richtlinie „Betonbauteile mit nichtmetallischer Bewehrung“ des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (DAfStb) eingespeist. Dennoch bestanden weiterhin offene Fragen zum Verhalten unter Gebrauchslasten sowie zum Tragverhalten von Verankerungen von nichtmetallischer Bewehrung. Die Projektergebnisse werden dazu beitragen, diesbezügliche Fragestellungen zu lösen, um das Anwendungsfeld des Carbonbetonbaus mit der 2. Fassung der DAfStb-Richtlinie deutlich zu erweitern. Zeitgleich ist eine DAfStb-Richtlinie „Verstärken von Betonbauteilen“ in Bearbeitung, in die die Ergebnisse für das Verstärken mit Carbonbeton aus dem Verbundvorhaben einfließen werden.

Um belastbare Ergebnisse erzielen zu können, die zur Überführung in allgemeingültige Nachweisformate und Regelwerke dienen, mussten im Verbundvorhaben umfangreiche experimentelle und theoretische Untersuchungen durchgeführt werden. Dafür wurden die bereitgestellten Mittel und die vorgesehen Personenmonate in vollem Umfang aufgewendet. Die experimentellen Untersuchungen, wurden zielgerichtet für spezifische offene Fragestellungen ausgelegt und durchgeführt. Die aufwändigen, dafür notwendigen Arbeiten wurden in der eingehenden Darstellung in Abschnitt II.1 dargelegt.

Das Erreichen der geplanten Ergebnisse im geplanten Umfang kann als Nachweis für die Angemessenheit der im Vorhaben geleisteten Arbeiten angesehen werden. Der ZE lieferte die

nötige Expertise und Praxiserfahrung, damit die Erreichung des Projektziels anwendungsrelevant gestaltet werden konnten. Nur mit den Fördermitteln des BMWi wurde das unternehmerische Risiko auf ein tragbares Minimum reduziert. Die allgemeinen Modelle und Regelungen für den GZG wurden aus baupraktischer Sicht geprüft. Damit konnte das Ziels von anwenderfreundlichen Regelungen wesentlich unterstützt werden.

Für die Mitarbeit des privatrechtlich organisierten ZE, die für das erfolgreiche Realisieren der Projektziele essentiell war, war eine finanzielle Förderung notwendig. Das große eigene Interesse am Projektvorhaben äußerte sich durch das Einbringen von Eigenmitteln, die einen ebenso signifikanten Beitrag zum Erreichen der hochgesteckten Ziele leisteten. Die im Antrag vorgesehenen Arbeitsschritte wurden vollständig bearbeitet. Die geleistete Arbeit entspricht in vollem Umfang der beantragten und bewilligten Arbeit und war entsprechend notwendig und angemessen.

Die im Vorhaben erarbeiteten Ergebnisse sind eine wesentliche Grundlage zur Entwicklung marktfähiger Produkte beim ZE. Die erreichten Ergebnisse können als Nachweis für die Angemessenheit der im Vorhaben geleisteten Arbeiten dienen.

4. Voraussichtlicher Nutzen bzw. Verwertbarkeit der Ergebnisse im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Wirtschaftliche Erfolgsaussichten: Die Ergebnisse des Teilvorhabens bilden den Ausgangspunkt für darauf aufbauende Verfahrens- und Produktentwicklungen mit klarer Ausrichtung auf die Marktfähigkeit. Die offenen Fragestellungen können in Folgeprojekten geklärt werden. Ein unmittelbarer unternehmerischer Nutzen (konkrete Produkte, Umsatzsteigerung, Erhöhung der Marktpräsenz) ergibt sich für den ZE nicht, legt aber die Grundlagen für die angestrebte konkrete Produktentwicklung bzw. Markteilnahme.

Ein mittelbarer wirtschaftlicher Nutzen entsteht für Hentschke Bau durch die Verwendung der erarbeiteten Erkenntnisse als Marktteilnehmer. Zum Zeitpunkt der Berichterstattung wurden bereits mehrere Praxisvorhaben mit Carbonbeton umgesetzt. Es entsteht eine verbesserte Ausgangslage für weitere anwendungs- und marktorientierte unternehmensbegleitende Auftragsforschung bzw. sogar für die direkte Anwendung und Produktentwicklung.

Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten: Die Ergebnisse des Teilvorhabens bedeuten einen unmittelbaren Kompetenzgewinn beim ZE und liefern einen wesentlichen Beitrag zur Weiterentwicklung im Bereich der Konstruktions- und Bemessungsregeln. Die benannten offenen Fragestellungen sollen in Folgeprojekten mit geeigneten Vorhabenpartnern adressiert werden.

5. Dem ZE bekannt gewordene Fortschritte bei anderen Stellen auf dem Gebiet und während der Durchführung des Vorhabens

Keine.

6. Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses

Erfolgte Veröffentlichungen der Ergebnisse:

Zu den Ergebnissen des Teilvorhabens sind keine eigenständigen Veröffentlichungen des ZE geplant. Die Ergebnisse des Teilvorhabens sind Basis für Veröffentlichungen der Vorhabenpartner. Die Ergebnisse wurden vor allem durch aktive Beteiligung bei der derzeitigen Überarbeitung der DAfStb-RL „nichtmetallische Bewehrung“ verfügbar gemacht.

Geplante Veröffentlichungen:

Zu den Ergebnissen des Teilvorhabens sind keine eigenständigen Veröffentlichungen des ZE geplant. Die Ergebnisse des Teilvorhabens sind Basis für zukünftige Veröffentlichungen der Vorhabenpartner. Die Ergebnisse werden vor allem durch aktive Beteiligung bei der derzeitigen Überarbeitung der DAfStb-RL „nichtmetallische Bewehrung“ verfügbar gemacht.

III. Anlage: kurzgefasster Erfolgskontrollbericht (wird nicht veröffentlicht)

separates Dokument.

IV. Mit dem Schlussbericht ist außerdem eine "Kurzfassung" (Berichtsblatt) des wesentlichen fachlichen Inhalts des Schlussberichts nach den dem Zuwendungsbescheid beigefügten "Hinweisen zur Ausfüllung des Berichtsblattes“ vorzulegen.

separates Dokument.