

## I. Schlussbericht zu Nr. 8.2 NKBF 98

**Zuwendungsempfänger:** Hentschke Bau GmbH  
Zeppelinstraße 15  
02625 Bautzen

**Förderkennzeichen:** 03LB2031C

**Vorhabenbezeichnung:** Verbundvorhaben: PAMB – Pilotanwendung modularer  
Brückenbau: Erprobung modularer, nichtmetallische bewehrter  
Überbauten unter realen Einsatzbedingungen; Teilvorhaben:  
Industrielle Fertigung

**Laufzeit des Vorhabens:** 01.08.2021 bis 30.04.2024

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz unter dem Förderkennzeichen 03LB2031C gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.“

## II. Kurzdarstellung

### 1. Aufgabenstellung

Ziel des Projektes ist die Entwicklung und Umsetzung einer Pilotanlage zur Erprobung von modularen Brückenüberbauten unter realitätsnahen Bedingungen. Das beinhaltet zum einen den Bau eines Straßenbrückenprototypen (Maßstab 1:1), der gänzlich im Werk vorgefertigt wird und somit keinen Einsatz von Ortbeton erfordert. Die Fertigteile werden über Druck gefügt, welcher durch Querspannglieder erzeugt wird. In diesem Fall erfolgt die Kraftübertragung in den Fugen über die aktivierte Reibung. Um fertigungsbedingte Unebenheiten ausgleichen zu können, ist auch die Verwendung dünner Epoxidharzschichten denkbar. Durch den Einsatz von nichtmetallischer Bewehrung ist dieser Prototyp korrosionsresistent, robust gegenüber Materialermüdung sowie sparsam im Materialeinsatz. Die Prototypenanlage ermöglicht die Belastung des Überbaus unter realem LKW-Einsatz. Diese Anlage wird flexibel gestaltet, sodass Bauteile mit variierenden Stützweiten getestet werden können. Die grundlegenden Untersuchungen zu den modularen Brückenüberbauten wurden bereits in einem Vorgängerprojekt „C<sup>3</sup> V2.9: Modulare Bausysteme – Ingenieurbau“ durchgeführt. Im Rahmen des beantragten Vorhabens ist nun die Prototypenanlage zu entwickeln.

Das Teilprojekt sollte die Herstellungstechnologie für die Anwendung von leichten, carbonbewehrten Fertigteilen aus vorgespanntem Carbonbeton weiterentwickeln und insbesondere das Match-Cast-Verfahren praktisch anwenden. Der Zuwendungsempfänger (ZE) wollte mit dem Teilvorhaben einen Beitrag in den Bereichen praxisgerechte Planung und Herstellungsprozesse leisten. Für den ZE standen die Erprobung geeigneter Technologien für die Herstellung passgenauer, vorgespannter Carbonbetonbauteile im Fertigteilwerk und die Wirtschaftlichkeit des Produktionsprozesses im Mittelpunkt. Voraussetzung für eine Produktentwicklung und wirtschaftliche Verwertung der Entwicklungen sind sowohl technisch geeignete Verfahren zur Herstellung von Carbonbeton, zur Herstellung extrem passgenauer Fügeflächen für vorgespannte Trockenfugen als auch die Wirtschaftlichkeit des gesamten Herstellprozesses.

An einem Pilotbauwerk war die praktische Umsetzbarkeit des entwickelten modularen Brückensystems unter praxisüblichen Bedingungen zu realisieren und zu bewerten.

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

Der ZE besitzt bereits Erfahrungen auf dem Gebiet der Herstellung von kleinformatischen ebenen und räumlichen Carbonbetonfertigteilen sowie in begrenztem Umfang für großformatige Carbonfertigteile (im Fertigteilwerk und in Ort beton) und sollte diese im Rahmen des Teilvorhabens bei der Weiterentwicklung der Teilprozesse im Fertigteilwerk einfließen lassen. Mit Hilfe des in der Fertigteilherstellung erfahrenen Personals sollten das Pilotbauwerk unter industriellen Randbedingungen ausgeführt, bzw. die Realisierbarkeit auch praxisüblicher Bauteilabmessungen unter industriellen Bedingungen erprobt und beurteilt werden.

Voraussetzung für das Teilvorhaben war eine enge Zusammenarbeit mit den Partnern innerhalb des Verbundprojektes, um durch Unterstützung vor allem der Forschungseinrichtungen auf die notwendige gerätetechnische und wissenschaftliche Kompetenz zurückgreifen zu können. Durch die intensive Zusammenarbeit mit den Forschungspartnern sollten Synergieeffekte zwischen Forschung und Praxis optimal genutzt werden. Durch die Standortentscheidung für das Pilotbauwerk im Zuge einer Bundesfernstraße erweiterte sich der Kreis der um zahlreiche projektexterne Partner, die für den Projekterfolg notwendig waren. Im Wesentlichen erhöhte sich dadurch der Abstimmungsbedarf als auch die öffentliche Wahrnehmung des Pilotbauwerks.

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**

Die Bearbeitung des Teilvorhabens war in verschiedene Arbeitspakete, Arbeitsschritte und Aktivitäten strukturiert (siehe Teilvorhabenbeschreibung) und enthielt folgende wesentliche Aktivitäten:

1. Beschreibung und Konzeption der industriellen Fertigungstechnologie inklusive Ableitung eines konkreten Anforderungsprofils;
2. Fertigung spezieller Probekörper unter Industriebedingungen zur Validierung der Fertigungstechnologie;
3. Recherche und Festlegung des Standortes / Baufelds;
4. Überwachung und Beratung der Planung im Hinblick auf die Umsetzbarkeit;
5. Bauprozess von der Baufeldfreimachung bis zum Abschluss;
6. Bewertung der Bauweise und des konkreten Prototyps hinsichtlich Wirtschaftlichkeit und Praxistauglichkeit;

Der Ablauf des Teilvorhabens folgte dieser Planung. Anpassungen waren im Wesentlichen zeitlich bedingt, da es beim ZE, bei Vorhabenpartnern aufgrund von Abhängigkeiten mit Projektexternen Partnern teilweise zu Verzögerungen gegenüber dem ursprünglichen Arbeits- und Zeitplan kam.

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

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

Die Segmentbauweise im Brückenbau eine international etablierte Bauweise dar [X]. Dabei werden Segmente mit Brückenbreite in Längsrichtung mittels Vorspannung gefügt. Die Querfugen sind zur Lastübertragung durch Formschluss i.d.R. profiliert ausgebildet. Gefüllte

Epoxidharze werden als adhäsiver Fugenfüllstoff verwendet und übernehmen einen gewissen Toleranzausgleich. Die Fugen sind jedoch nicht ohne Beschädigung wieder lösbar.

Eine Alternative stellen bspw. Trockenfugen dar, deren Einsatz seit einigen Jahren im Windenergieanlagenbau und auch im Brückenbau untersucht wird. Aus statischer Sicht ist der Schwerkraftnachweis in der Fuge wesentlich, um ein Auseinandergleiten der Kontaktpartner zu verhindern.

Die Herstellung von leichten, kleinformatischen Bauteilen aus Carbonbeton ist Stand der Technik [2], [3]. Zur Anwendung der Vorspannung im sofortigen Verbund waren Anwendungen aus dem Ausland mit Einzelrovings mit Durchmesser von ca. 1 mm [4] und Spanndrähten mit 2 ... 3 mm Durchmesser [9] bekannt. Diese kleinen Vorspannelemente ermöglichen jedoch keine sinnvollen Anwendungen für übliche Bauteile des allgemeinen Hochbaus und des Ingenieurbaus. Aus dem Verbundvorhaben C3-V4.2 war der Entwicklungsstand der Vorspanntechnik mit duroplastischen Carbonelementen größeren Durchmessers ( $d = 12,5$  mm) bekannt [10], [11], [12].

Die weltweit erste Anwendung von Carbonlitzen als Vorspannung im sofortigen Verbund erfolgte 1988 in Japan [5] an der Shinmiya Brücke. Tragfähigkeit und Langzeiteigenschaften wurden eingehend untersucht [6], [7]. Untersuchungen zu Verbundeigenschaften an Litzen mit  $d = 7,5$  mm und 10 mm [8] zeigten deutlich höhere Verbundspannungen als Stahllitzen, was auf eine mögliche Spaltrissgefahr hindeutet. Innerhalb des C3-Projekts V2.9 wurde der Einsatz von Carbonlitzen mit  $d = 12,5$  mm mit einem Prototypen verifiziert. Weitere Anwendungserfahrungen mit dieser Vorspanntechnik lagen in Deutschland nicht vor.

Die Randbedingungen für den praktischen Einsatz von vorgespannten Fertigteilen mit Vorspannung im sofortigen Verbund im Brückenbau sind seit 1993 deutlich eingeschränkt [13], [14], [15]. Für schlanke, materialeffiziente Bauteilgeometrien bietet sich die Verwendung von Hochleistungsbetonen (HLB) an. Herstellung, Förderung, Einbau und Nachbehandlung von HLB ist im Bereich des Hochbaus Stand der Technik [16], im Bereich des Ingenieurbaus Stand der Wissenschaft. Im Brückenbau als Teil des Ingenieurbaus ist die Anwendung in Deutschland bisher über einige wenige Pilotprojekte [26] mit aufwendiger Begleitforschung nicht hinausgekommen. In einschlägigen Vorschriften des Ingenieurbaus [14], [15], [18] ist HLB kein zugelassener Baustoff. In der Praxis ist der Einsatz von HLB ohne aufwändiges Genehmigungsverfahren deshalb derzeit nicht möglich. Allgemein anerkannter Stand der Technik ist das Bauen mit Hochleistungsbetonen im Ingenieurbau demnach nicht.

Für die Anwendung textiler Carbonbewehrungen gibt es bereits Anwendungen als Ergebnis wirtschaftlicher Aktivitäten. Im Bereich kleinformatischer ebener Platten existieren einige Hersteller, die Carbonbeton für Fassadenplatten und ähnliche kleinformatische Bauteile in Verkehr bringen, siehe bspw. [2], [3]. Die Produktionsverfahren und -prozesse sind weitgehend unzugängliches Firmenknowhow. Im Bereich des Hochbaus gibt es bisher einige Pilotprojekte, die unter intensiver Begleitung von Forschungseinrichtungen umgesetzt wurden, siehe bspw. [27], [28], [29], [Cube]. Sie zeigen, dass es für eine effiziente Herstellung mit hoher Lagegenauigkeit der textilen Bewehrungen noch erheblichen Klärungsbedarf gibt. Der Stand zu stabförmiger Carbonbewehrung ist in der Verbundvorhabenbeschreibung dargestellt. Zum Berichtszeitpunkt waren keine stabförmigen Carbonbewehrungen mit Allgemeiner bauaufsichtlicher Zulassung marktverfügbar.

Schlanke und leichte vorgespannte Betonfertigteile für den Brückenbau gibt es aktuell nicht, da die Anwendung von Spannbeton seit 1993 stark reglementiert wurde [4]. Für die Verwendung von Spanngliedern aus Carbon kann auf die Erfahrungen des C3-Projekts V4.2 zurückgegriffen werden, für die Verwendung von Vorspannung im sofortigen Verbund auf die Erfahrungen des C3-Projekts V2.9. Dort wurde die Herstellung eines Einzelmoduls verifiziert

[V2.9]. In der DAfStb-RL Betonbauteile mit nichtmetallischer Bewehrung [23] bzw. [24] ist Vorspannung aktuell nicht geregelt. Für Empfehlungen und Regeln zur Bemessung und Konstruktion mit Vorspannung im sofortigen Verbund wird daher auf Regelwerke außerhalb des Geltungsbereich der Landesbauordnungen zurückgegriffen, vor allem [19]-[22]. Diese Regeln sind entsprechend ihrer Übertragbarkeit auf [16] zusammen mit [17] bzw. [18] zu bewerten und anzuwenden.

Der Stand des Wissens zu Carbonbeton allgemein ist bspw. in [30] und [31] zusammenfassend dokumentiert. Der Einsatz von Textilbeton in Pilotprojekten und Demonstrationsbauwerken erfolgt derzeit über Zustimmungen im Einzelfall [32]-[36] und vereinzelt über allgemeine bauaufsichtliche Zulassungen (u.a. ebene Platten [37]-[39], Sandwichplatten [40], Raumzellen [41]). Es gibt vereinzelt Veröffentlichungen zu möglichen Produktionsverfahren [42], [43], [53], [54], jedoch nicht im industriellen Maßstab. Erste Laboruntersuchungen zu großformatigen Bauteilen wurden mit Beteiligung des ZE hergestellt [56], [57].

Für die Anforderungen an den Beton und die Bauausführung wird auf das einschlägige Regelwerk [45]-[51] und die bereits verfügbaren Teile von [23] zurückgegriffen. Eigenschaften der als Entwicklungsgrundlage verwendbaren Hochleistungsbetone aus dem Basisprojekt B2 wurden bereits ausreichend charakterisiert [44], [52].

#### **verwendete Fachliteratur sowie benutzte Informations- und Dokumentationsdienste**

- [2] Allgemeine Bauaufsichtliche Zulassung Z-33.1-577: „betoShell“ Platten aus Betonwerkstein mit rückseitig einbetonierten Befestigungselementen zur Verwendung als hinterlüftete Außenwandbekleidung oder als abgehängte Decke. 27.11.2013
- [3] Allgemeine Bauaufsichtliche Zulassung Z-33.1-843: „betoShell BIG“ Fassadenplatten aus Betonwerkstein mit rückseitig einbetonierten Befestigungselementen zur Verwendung als hinterlüftete Außenwandbekleidung. 27.11.2012
- [4] Fortslechner, F. X.; Freytag, B.; Peters, St.: Spannbett-Vorspannung dünner Carbonbeton-Platten. In: *Beton- und Stahlbetonbau* **110** (2015) 6, S. 419-428 – DOI: 10.1002/best.201400087
- [5] Santoh, N.; Kimura, H.; Enomoto, T.; Kiuchi, T.; Kuzuba, Y.: Fiber-Reinforced-Plastic (FRP) Reinforcement. *Proceedings of the International ACI Symposium on Concrete Structures 1993*, SP-138, S. 895–911
- [6] Nguyen, H.; Masuya, H.; Ha, T.; Fukada, S.; Hanaoka, D.; Kobayashi, K.; Koida, E.: Long-term Application of Carbon Fiber Composite Cable Tendon in the Prestressed Concrete Bridge-Shinmiya Bridge in Japan. In: *MATEC Web of Conferences*. 206. (2018) 02011 – DOI:10.1051/mateccconf/201820602011
- [7] Hue N. T.: *Study on durability and practicability of concrete bridge using carbon fiber reinforced plastic tendon*. Dissertation. Graduate School of Natural Science & Technology, Kanazawa Universität, 2020, 104 S.
- [8] Stark, A.; Hegger, J.: Verbundverhalten von CFK-Spannbewehrungen in UHPFRC. *Beton- und Stahlbetonbau* **108** (2013)10, S. 701-710 – DOI:10.1002/best.201300038
- [9] Terrasi, G. P.: *Mit Kohlenstoffasern vorgespannte Schleuderbetonrohre*. Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt, Dübendorf, 1998, Bericht Nr. 240, 322 S.

- [10] Apitz, Andreas (2017): Suitability of CFRPs for Prestressing of Concrete Bridges. In: Proceedings of Young Engineers Colloquium in Bochum
- [11] Schlaich, M.; Apitz, A.; Goldack, A.: Form optimized CFRP reinforced and post-tensioned integral concrete bridge using precast girders. In: *IABSE Symposium Report, Nantes 2018*.
- [12] Jesse, F.; Apitz, A.; Schlaich, M.: Dauerhafte und wirtschaftliche Straßenbrücken mit Halbfertigteilen aus vorgespanntem Carbonbeton. In: 29. *Dresdner Brückenbausymposium, 11.-12.03.2019*. (Konferenzband)
- [13] Allgemeines Rundschreiben Straßenbau Nr. 23/1993; Sachgebiet 05.4: Brücken- und Ingenieurbau; Bauarten; Verwendung von Spannbeton-Fertigteilträgern für Brücken der Bundesfernstraßen
- [14] Bundesanstalt für Straßenwesen (Hrsg.): *Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten (ZTV-ING)*.
- [15] Bundesanstalt für Straßenwesen (Hrsg.): *Richtlinie für den Entwurf, die konstruktive Ausbildung und Ausstattung von Ingenieurbauten (RE-ING)*.
- [16] DIN EN 1992-1-1:2010-12: Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken - Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau; Deutsche Fassung EN 1992-1-1:2004 + AC:2010
- [17] DIN EN 1992-1-1 2013-04: *Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau*
- [18] DIN EN 1992-2:2010-12: Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken - Teil 2: Betonbrücken - Bemessungs- und Konstruktionsregeln; Deutsche Fassung EN 1992-2:2005 + AC:2008
- [19] ACI 440.1R-15: *Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with FRP Bars*. American Concrete Institute, 2015
- [20] CAN/CSA-S806-12: *Design and Construction of Building Components with Fiber-Reinforced Polymers*. The Canadian Standards Association, 2012
- [21] CNR-DT 203/2006: *Guide for the Design and Construction of Concrete Structures Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer Bars*. Italian National Research Council, Rome, 2007 – online: <https://www.cnr.it/en/node/2639>
- [22] JSCE: *Guide for the Design and Construction of Concrete Structures Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer Bars*. Japan Society of Civil Engineers, 2006
- [23] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton e.V. (Hrsg.): *DAfStb-Richtlinie Betonbauteile mit nichtmetallischer Bewehrung*. (Entwurf, Fassung 2022)
- [24] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton e.V. (Hrsg.): *DAfStb-Richtlinie Betonbauteile mit nichtmetallischer Bewehrung*. (Fassung 2024-01)
- [25] Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt): Richtlinien für die Prüfung von Spannstählen auf ihre Eignung zur Verankerung durch sofortigen Verbund. In: *IfBt-Mitteilungen* (1980) Nr. 6, S. 174-177 – online: <https://www.dibt.de/fileadmin/dibt->

- [26] König, G.; Schmidt, D; Wagner, P.; Zink, M.: Hochleistungsbeton für den Brückenbau. *Beton- und Stahlbetonbau* 93 (1998) 5, S. 117-124 – DOI: 10.1002/best.199800230
- [27] Rempel, S.; Will, N.; Hegger, J.; Beul, P.: Filigrane Tragwerke aus Textilbeton. *Beton- und Stahlbetonbau* 110 (2015) S1, S. 83-93 – DOI:10.1002/best.201400111
- [28] Scheerer, S.; Michler, H.: Freie Formen mit Textilbeton. *Beton- und Stahlbetonbau* 110 (2015) S1, S. 94-100 – DOI:10.1002/best.201400113
- [29] Walter, T.; Weiland, S.: Baustellenverfahren für die Verstärkung mit Textilbeton. *Beton- und Stahlbetonbau* 110 (2015) S1, S. 69-73 – DOI:10.1002/best.201400099
- [30] Initialkonzept "Carbon Concrete Composite – C<sup>3</sup>", Antrag auf Förderung des Initialkonzepts im Rahmen des Programms Zwanzig20 des Bundesministeriums für Bildung und Forschung; Technische Universität Dresden, 2. April 2013
- [31] Jesse, F. & Curbach, M.: Verstärken mit Textilbeton. In: Bergmeister, K.; Fingerloos, F. & Wörner, J.-D. (Eds.): *Beton-Kalender 2010*. Berlin : Ernst & Sohn, 2010, Teil 1, Abschnitt VII, S. 457-565
- [32] Ehlig, D.; Schladitz, F.; Frenzel, M.; Curbach, M.: Textilbeton – Ausgeführte Projekte im Überblick. *Beton- und Stahlbetonbau* **107** (2012), H11, S. 777–785
- [33] Hegger, H.; Goralski, C.; Kulas, C.: Schlanke Fußgängerbrücke aus Textilbeton. *Beton- und Stahlbetonbau* **106** (2011), 2, S.64–71
- [34] Hegger, J.; Will, N.; Schneider, H. N.; Kölzer, P.: Neue Bauteile aus textilbewehrtem Beton, Anwendungspotential und Ausführungsbeispiele. *Beton- und Stahlbetonbau* **99**, 6, S.482–487
- [35] Kulas, C.; Goralski, C: Die weltweit längste Textilbetonbrücke, Technische Details und Praxiserfahrungen. *Beton- und Stahlbetonbau* **109** (2014), H11, S.812–817
- [36] Michler, H.: Segmentbrücke aus textilbewehrtem Beton, Rottachsteg Kempten im Allgäu. *Beton- und Stahlbetonbau* **108** (2013), 5, S.325–334
- [37] Allgemeines bauaufsichtliche Zulassung Z-33.1-577: "betoShell Classic" Platten aus Betonwerkstein mit rückseitig einbetonierten Befestigungselementen zur Verwendung als hinterlüftete Außenwandbekleidung oder als abgehängte Deck. Hering Bau GmbH & Co. KG Neuländer 1 Holzhausen 57299 Burbach, 2013
- [38] Allgemeines bauaufsichtliche Zulassung Z-33.1-843: "betoShell® BIG" Fassadenplatten aus Betonwerkstein mit rückseitig angeordneten Plattentragprofilen für die Verwendung als hinterlüftete Außenwandbekleidung. Hering Bau GmbH & Co. KG Neuländer 1 Holzhausen 57299 Burbach, 2010
- [39] Allgemeines bauaufsichtliche Zulassung Z-10.3-723: Fassadenplatten "betoShell Neo 30" aus Textilbeton zur Verwendung bei vorgehängten hinterlüfteten Außenwandbekleidungen. Hering Bau GmbH & Co. KG Neuländer 1 Holzhausen 57299 Burbach, 2017
- [40] Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Z-71.3-39: *solidian Sandwichwand*. solidian GmbH Sigmaringer Straße 150 72458 Albstadt, 2017

- [41] Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Z-71.3-40: *Kleingebäude, Raumzellen (Fertigarage)*. solidian GmbH Sigmaringer Straße 150 72458 Albstadt, 2018
- [42] Brameshuber, W.; Mott, R.; Hegger, J.; Voss, S.; Gries, T.; Barle, M.; Böhm, S.; Hartung, I.: Serielle Stückfertigung von Bauteilen aus textilbewehrtem Beton. *Beton- und Stahlbetonbau* **103** (2008) 2, S. 64-72
- [43] Brameshuber, W.: Textilbewehrter Beton – ein neuer Verbundwerkstoff. In Müller, H. S.; Nolting, U.; Haist, M.: 3. *Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung*. Universität Karlsruhe (TH), 2006, S.45–52
- [44] Walther, T.; Schladitz, F.; Curbach, M.: Textilbetonherstellung im Gießverfahren mit Hilfe von Abstandhaltern. *Beton- und Stahlbetonbau* **109** (2014), H3, S.216–222
- [45] DIN EN 13670:2011-03: *Ausführung von Tragwerken aus Beton; Deutsche Fassung EN 13670:2009*
- [46] DIN 1045-3:2012-03: *Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton – Teil 3: Bauausführung – Anwendungsregeln zu DIN EN 13670*
- [47] DIN EN 13369:2013-08: *Allgemeine Regeln für Betonfertigteile. Deutsche Fassung EN 13369:2013.*
- [48] DIN 1045-4:2012-02: *Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton – Teil 4: Ergänzende Regeln für die Herstellung und die Konformität von Fertigteilen.*
- [49] Hilsdorf, H. K.: Criteria for the Duration of Curing. In: *Adam Neville Symposium on Concrete Technology*. American Concrete Institute, 1995, S. 129-146
- [50] EN 206-1:2001-07: *Beton – Teil 1: Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität. Deutsche Fassung EN 206-1:2000*
- [51] DIN 1045-2:2008-08: *Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton – Teil 2: Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität – Anwendungsregeln zu DIN EN 206-1*
- [52] Lorenz, E.; Schütze, E.; Schladitz, F.; Curbach, M.: Textilbeton – Grundlegende Untersuchungen im Überblick. *Beton- und Stahlbetonbau* **108** (2013) 10, S. 711-722
- [53] Rempel, S.; Will, N.; Hegger, J.; Beul, P.: Filigrane Bauwerke aus Textilbeton, Leistungsfähigkeit und Anwendungspotenzial des innovativen Verbundwerkstoffs. *Beton- und Stahlbetonbau Spezial* 2015, S.83–93
- [54] Walther, T.; Schladitz, F.; Curbach, M.: Textilbetonherstellung im Gießverfahren mit Hilfe von Abstandhaltern. *Beton- und Stahlbetonbau* **109** (2014), H3, S.216–222
- [55] DIN EN 1992-1-1 2011-01: *Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau; Deutsche Fassung EN 1992-1-1:2004 + AC:2010*
- [56] Schmidt, M.; Bielak, J.; Hegger, J.: Large-Scale Tests on the Structural and Deformation Behaviour of I-Beams with Carbon Reinforcement. In: *Proceedings of Fiber Reinforced Polymer Reinforced Concrete Structures (FRPRCS 14), Belfast, UK, 2019*. 6 S.

- [57] Bielak, J.; Hegger, J.: Carbonbeton-Fertigteilträger im Großversuch - Trag- und Verformungsverhalten = Large-scale tests on precast carbon-reinforced concrete beams - Structural and deformation behaviour. In: *BFT international* **85** (2019) 2, S. 52
- [58] Boschung, P.: Eine federleichte Betonbrücke. **Baublatt** (19. Mai 2017), Nr. 20, S. 14-18
- [59] Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung/Allgemeine Bauartengenehmigung Nr. Z-71.3-42 vom 15. November 2021 „Carbonbewehrte, vorgespannte CPC-Platten aus Vergussbeton“
- [60] Berufsgenossenschaft der Bauwirtschaft (Hrsg.): *DGUV Regel 101-001: Transportanker und -systeme von Betonfertigteilen*. Ausgabe April 1992
- [61] Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Nr. Z-30.3-6 vom 20.04.2022 „Erzeugnisse, Bauteile und Verbindungselemente aus nichtrostenden Stählen“
- [62] Roberts-Wollmann, C. L. ; Breen, J. E.; Kreger, M. E.: Temperature Induced Deformations in Match Cast Segments. In: *PCI Journal* **40** (1995), July-August, S. 62-71

## 5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Eine enge und intensive Zusammenarbeit fand mit allen Vorhabenpartnern statt:

- Hochschule für Technik und Wirtschaft (HTW) Dresden, Professur Brücken- und Ingenieurbau
- Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung cbing – Curbach Bösche Ingenieurpartner PartG mbB, Dresden
- Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule (RWTH) Aachen, Lehrstuhl und Institut für Massivbau

## III. Eingehende Darstellung

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

Aufgrund der Abhängigkeiten der geplanten Arbeiten von anderen Forschungspartnern und im den Arbeitsgruppen getroffenen Änderungsentscheidungen zur Abarbeitung des Forschungsvorhabens, weichen die durchgeführten Arbeiten im TP3 teilweise inhaltlich und terminlich von der ursprünglichen Planung ab. Die nachfolgende Darstellung ordnet die durchgeführten Arbeiten den ursprünglich geplanten Aktivitäten zu.

**Ziel: Beschreibung und Konzeption der industriellen Fertigungstechnologie inklusive Ableitung eines konkreten Anforderungsprofils. (Aktivität 1.1.3)**

**Ergebnis:**

Aus Aktivität 1.1.1 und aus planerischen Vorgaben resultiert folgendes Anforderungsprofil an die Herstellungstechnologie:

1. Hohe Genauigkeitsanforderungen an die Schalung;
2. Hohe Anforderungen an die Nachbehandlung und Lagerung der Bauteile;

3. Technologie zur Sicherung der Passgenauigkeit zwischen den Fertigteilen;
4. Ggf. Implementierung einer gesonderten Fertigungsüberwachung;
5. Fahrbahnoberfläche mit hinreichender Oberflächenrauigkeit für Betonfahrbahnen;

Entsprechend diesen Anforderungen wurde folgende Herstellungstechnologie gewählt:

1. Herstellung in klassischer Holzwerkstoff-Schalung auf Basis üblicher Systemschalung mit CNC-gefertigten Schalelementen zur Sicherstellung der hohen Genauigkeitsanforderungen;
2. Wahl eines Schalungsplatzes ohne wesentliche Nachgiebigkeit im Unterbau bzw. Untergrund zur Vermeidung signifikanter Verformungen infolge der Frischbetonlasten, d.h. möglichst steifer Schalungsunterbau und Untergrund;
3. Fertigung in Einbaulage mittels Match-Cast-Verfahren;
4. Verwendung eines Betons mit Größtkorn 8 mm und fließfähiger Konsistenz im Bereich F4, Einbau mittels Betonkübel und Schüttröhre für Fallhöhen < 0,5 m zur Vermeidung von Entmischungserscheinungen; Verdichtung der Stegbereiche mittels Außenrüttler, Verdichtung der Endquerträger und Flanschbereiche mittels Außenrüttler und Innenrüttler mit passendem Außendurchmesser, Anordnung von Rüttelöffnungen in der oberen Bewehrungslage;
5. Herstellung der Fahrbahnoberfläche mittels Besenstrich zur Erzielung ausreichender Griffigkeit der Fahrbahn;
6. Fertigungsüberwachung mittels Reifegradverfahren zur Sicherstellung möglichst gleicher Reife / Betonfestigkeit zum Vorspannzeitpunkt zur Minimierung unterschiedlicher Bauteilverformungen infolge Vorspannkraft wegen unterschiedlicher Betoneigenschaften zum Vorspannzeitpunkt.

Die hohen Genauigkeitsanforderungen an die Schalung betreffen insbesondere die späteren Kontaktflächen der feldlangen Fertigteile. Alternativ zum Match-Cast-Verfahren wäre auch eine hochpräzise Stahlschalung oder eine nachträgliche Oberflächenbearbeitung z.B. durch Schleifen möglich gewesen. Die Fertigungsgenauigkeiten der Stahlschalung wurden jedoch als unzureichend bewertet und die gesonderte Herstellung einer Stahlschalung als nicht wirtschaftlich verworfen. Die nachträgliche Bearbeitung der Kontaktflächen mittels Schleifen wurden als technisch geeignet befunden, jedoch fehlen beim ZE die technischen Voraussetzungen für die Anwendung dieses Fertigungsverfahrens. Deshalb kam es nicht zur Anwendung.

**Ziel: Fertigung spezieller Probekörper unter Industriebedingungen zur Validierung der Fertigungstechnologie. (Aktivität 2.2.1)**

**Ergebnis:**

Für den Vorhabenpartner HTW Dresden wurden kleinformatige Betonprismen hergestellt und für experimentelle Untersuchungen zum Vorhabenpartner geliefert. Abweichend zur ursprünglichen Planung wurde aber seitens der Vorhabenpartner auf einen durch den ZE im Projekt C3-V2.9 hergestellten Träger (Länge 16,00 m, T-Querschnitt b/h = 1m50 m / 1,09 m) in der Aktivität 2.1.2 genutzt. Diese Vorgehensweise wurde seitens der Vorhabenpartner als zielführender eingestuft.

Alle seitens der Vorhabenpartner benötigten Probekörper für die Aktivitäten 2.1.1 und 2.1.2 wurden hergestellt und an die Vorhabenpartner für die dort geplanten Untersuchungen ausgeliefert.

## **Ziel: Recherche und Festlegung des Standortes / Baufelds. (Aktivität 3.2.1)**

### **Ergebnis:**

Für den Standort des Piloten sollten folgende Anforderungen berücksichtigt werden:

1. Spannweite ca. 15 m, Breite ca. 4,5 m (2 Richtungsfahrbahnen);
2. Regelmäßige Belastung durch üblichen Straßenverkehr inkl. LKW- und Schwerverkehr;
3. Standort innerhalb Sachsens wegen Transportentfernung und ausreichender Zugänglichkeit während der Nutzungszeit zur Inspektion;

Ursprüngliche Überlegungen zur Realisierung auf dem Werksgelände des ZE haben sich als nicht zielführend erwiesen. Mögliche Standorte mit der angestrebten Verkehrsbelastung waren auf dem Werksgelände entweder nicht verfügbar oder eine bauzeitliche Sperrung war aufgrund zu starker Störung des laufenden Betriebs nicht darstellbar.

Anfragen bei der sächsischen Straßenverwaltung, dem Landesamt für Straßen und Verkehr (LASuV) haben mehrere Standorte mit Baurecht und geometrisch geeigneten Randbedingungen zum Ergebnis gehabt. Nach Abwägung der Vor- und Nachteile fiel die Standortentscheidung zugunsten einer bauzeitlichen Umgehung im Zuge der Bundesfernstraße B173 westlich von Freiberg/Sa. südlich der Ortslage Kleinschirma. Im Zuge der B173 waren zwei Ersatzneubauten erforderlich geworden. Für die Erstellung dieser zwei Bauwerke war eine bauzeitliche Umgehung bereits in Planung. In dieser Umgehung konnte das Pilotbauwerk eingefügt werden. Die geplante Nutzungsdauer des Pilotbauwerks von ca. 12 Monaten reduzierte insbesondere das Risiko der Erteilung der erforderlichen Zustimmung im Einzelfall, da eine Beurteilung hinreichender Tragfähigkeit, Dauerhaftigkeit und Verkehrssicherheit durch die beteiligten Amtsträger nur für einen vergleichsweise kurzen Nutzungszeitraum zu beurteilen waren.

Weiterhin hat sich während der Bearbeitung herausgestellt, dass auch für einen Standort auf dem Betriebsgelände des ZE eine Zustimmung im Einzelfall bei der obersten Baubehörde erforderlich gewesen wäre. Die ursprüngliche Annahme, dass ein Standort auf Privatgelände zu einem wesentlich reduzierten Genehmigungsaufwand führt, hat sich als falsch herausgestellt.



**Bild 1:** Luftbild des Pilotstandortes (Rotmarkierung) im Zuge einer bauzeitlichen Umfahrung an der B173 östlich von Freiberg/Sa. während der Betriebsphase des Pilotbauwerkes (Quelle: Google Maps)

**Ziel: Überwachung und Beratung der Planung im Hinblick auf die Umsetzbarkeit. (Aktivität 3.2.2)**

**Ergebnis:**

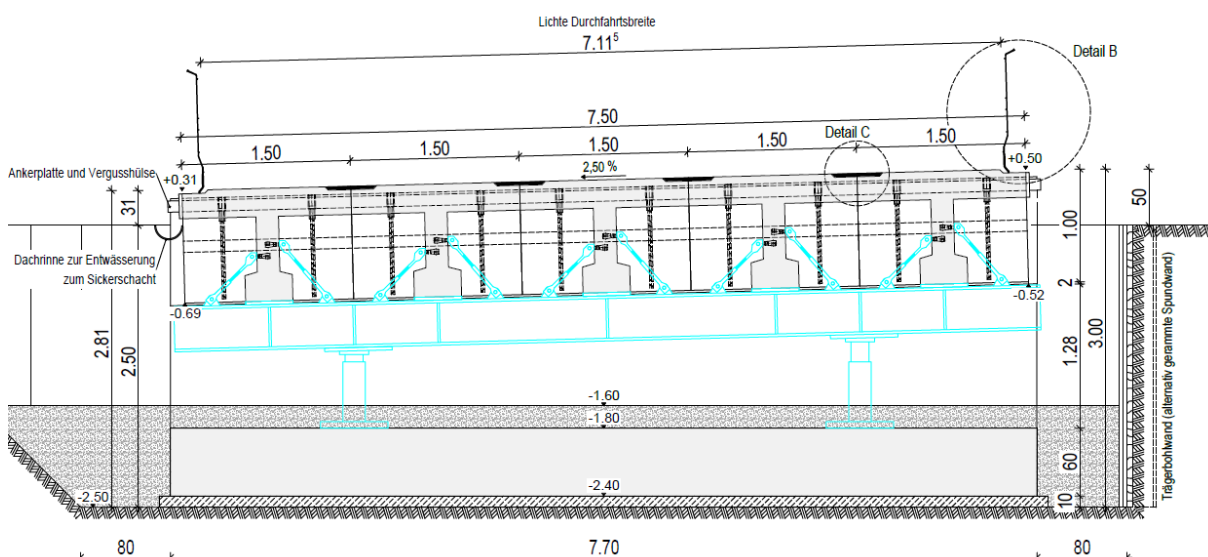
Für das Pilotbauwerk liegt eine praktisch ausführbare Planungsunterlage als Vorleistung für Aktivität 4.1.1 vor. Exemplarisch können folgende Änderungsvorschläge an die Vorhabenpartner als Ergebnis der Arbeit des ZE genannt werden, die wesentlich zu einer zielsicheren und wirtschaftlichen Ausführung beigetragen haben:

1. Wechsel vom ursprünglich geplanten kleineren Vorspannelementen auf Tokyorope CFCC12,5: Durch die Verwendung von Vorspannelementen mit größerem Querschnitt ergeben sich folgende Vorteile:
  - a. Insgesamt wird die Anzahl der Vorspannelemente reduziert, entsprechend sinkt der Arbeitsaufwand für Einbau und Vorspannung.
  - b. Der benötigte Platz in der Zugzone wird geringer und die ursprüngliche vorhandene untere Flanschverbreiterung konnte vollständig entfallen. Dadurch wird auch der Aufwand für den Schalungsbau reduziert.
  - c. Im Bereich der Schräge an der Oberseite der Stegverbreiterung ist die Entlüftung des Betons bei der Verdichtung behindert, da entweichende Luft zumindest teilweise an der Schalung verbleibt und nicht vollständig entweichen kann. Der Entfall der Stegverbreiterung vermeidet diese kritischen Bereiche vollständig.
2. Ursprünglich waren mehrere Zwischenquerträger geplant, um die Tragwirkung der vorgespannten Trockenfuge sicher zu stellen. Auf Anregung und Bitten des ZE wurden die statischen Berechnungen mehrfach optimiert und verfeinert. Vermeidung von Zwischenquerträgern im Feldbereich reduziert den Fertigungsaufwand signifikant. Grundsätzlich muss bei Vorspannung im sofortigen Verbund beachtet werden, dass die Vorspannung nicht in die Schalung eingetragen wird. Bei den End- und Zwischenquerträgern muss die Schalung dann so konstruiert werden, dass die

Bauteilverkürzung infolge Vorspannung nahezu spannungsfrei aufgenommen werden kann und die Schalung während des Betoneinbaus trotzdem dicht bleibt. Dies ist i.d.R. mit erheblichem Aufwand bei der Schalungsherstellung verbunden. Der durch die optimierten statischen Berechnungen mögliche Verzicht auf Zwischenquerträgern führte deshalb zu einer erheblichen Reduzierung des Schalungsaufwandes und gleichzeitig zu einer besseren gestalterischen Qualität.

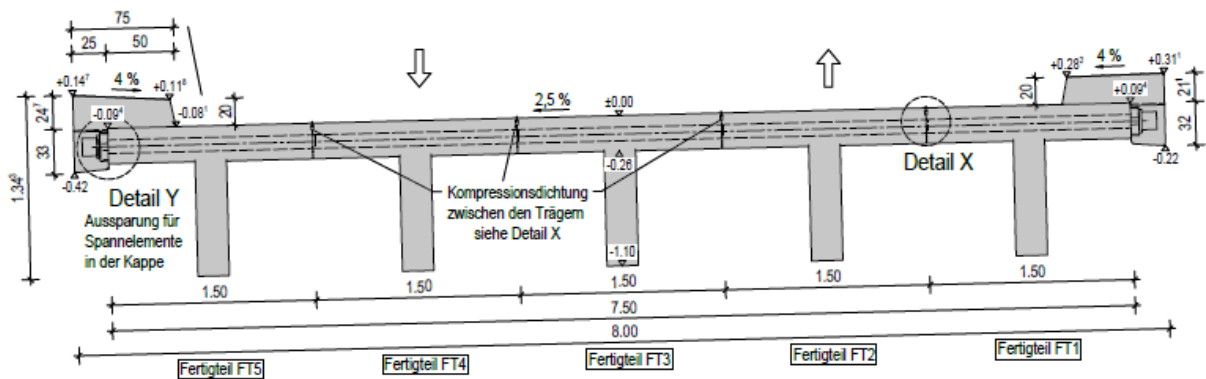
3. Vereinfachung der Bewehrungsformen hinsichtlich Fertigungs- und Montageaufwand.
  - a. In hochbewehrten Bereichen konnte die Lagenanzahl der schlaffen Bewehrung von 7 Lagen auf 4 Lagen reduziert werden, damit wird die Betonierbarkeit deutlich verbessert.
  - b. Die Bewehrungsformen wurden vereinfacht. Statt komplexer 3D-geformter Bewehrungen werden einfache Halbfertigteile (L-Form, U-Form) in Kombination mit ebener Mattenbewehrung geplant. Das reduziert die Bewehrungskosten bei gleichzeitig sichererer und einfacherer Ausführung mehrlagiger Bewehrungen.
  - c. Die Nutzung des Widerlagers auch als Montagelager ermöglicht den Entfall der Traggerüstkonstruktion. Dazu wird der Überbau bei der Montage direkt auf Montagelagern auf der Widerlagerbank aufgelegt.
  - d. Ab Werk angeformte Kappen reduzieren Schal- und Fertigungsaufwand auf der Baustelle und Bauzeit auf der Baustelle. Herstellung der Kappe im Fertigteilwerk erfolgt unter werkmäßigen Bedingungen. Das sorgt für gute Randbedingungen in der Herstellung.
  - e. Ersatz der ursprünglich geplanten Abdichtung zwischen den FT mittels Walzasphalt durch ein Fugenprofil reduziert Kosten und Montagezeit auf der Baustelle;
  - f. Aus Fertigteilen zusammengesetzte Widerlagerkonstruktion reduziert Bauzeit für die Unterbauten auf ein Minimum. Fügung erfolgt ebenfalls mit einer Trockenfuge.

Im Ergebnis liegt eine Planung für ein vollmodulares Brückensystem vor, dessen Überbau sowohl hinsichtlich Länge und Breite variabel anpassbar ist. Er besteht jeweils gleichen Mittelfertigteilen und zwei symmetrischen Randfertigteilen. Zusätzlich sind auch die Unterbauten modular ausgelegt und mit vorgespannter Trockenfuge gefügt. Prinzipiell ist sowohl der Aufbau als auch der Rückbau der Brücke innerhalb eines Arbeitstages machbar. Details zur geplanten Lösung finden sich im Schlussbericht der Vorhabenpartner.



**Bild 2:** Regelquerschnitt vor Optimierung und Detailplanung (Quelle: C3-Projekt V2.9)

## Querschnitt bauzeitliche Umfassung Bereich Brückenbauwerk M 1:25



**Bild 3:** Regelquerschnitt nach Beratung mit den Vorhabenpartnern und mehreren Optimierungsschritten (Quelle: gleichgestellter Ausführungsplan des Pilotbauwerks)

**Ziel: Bauprozess von der Baufeldfreimachung bis zum Abschluss. (Aktivität 4.1.1)**

**Ergebnis:**

Für das Pilotbauwerk wurden folgende Einzelbauteile hergestellt:

- 4 Stück Widerlager-Fertigteile, je 2 Stück für Achse 10 und 2 Stück für Achse 20;
- 4 Stück Winkelstützwände zur Böschungssicherung, je 2 Stück für Achse 10 und 2 Stück für Achse 20;
- 5 Überbau-Fertigteile, davon 2 mit angeformter Kappe;

**Beschreibung der Herstellung der Fertigteile (FT)**

### Winkelstützwandelemente

Bei den Winkelstützwänden handelt es sich um herkömmliche Stahlbeton-Fertigteile. Diese wurden in Negativlage ohne weitere Besonderheiten gefertigt und werden hier nicht weiter betrachtet.

### Widerlager-FT

Die Widerlager Achse 10 und Achse 20 bestehen aus je 2 Fertigteilen mit herkömmlicher Betonstahlbewehrung, bei denen nach Montage auf dem Baufeld mittels Vorspannung einer ebenen Trockenfuge eine gemeinsame Tragwirkung aktiviert werden soll. Die Herstellung erfolgte in Einbaulage im Match-Cast-Verfahren (Bild 4). D.h. das jeweils erste FT jeder Achse wurde vollständig in Schalung hergestellt und entsprechend der Planungsvorgaben nachbehandelt. Das zweite FT der Widerlagerachse wurde ebenfalls in Schalung hergestellt, mit Ausnahme der späteren Kontaktfläche zum ersten FT. Hier wurde die spätere Kontaktfläche des ersten FT mit einem Trennmittel versehen und als Schalung für das zweite FT verwendet. Nach erfolgter Aushärtung und dem Ende der Nachbehandlung waren die FT jeweils bereit zur Auslieferung.



**Bild 4:** Bewehrungskorb eines Widerlagers mit Betonstahlbewehrung

## Überbau-FT

Der Überbau besteht aus insgesamt 5 FT mit Carbonbewehrung und Carbonvorspannung. Folgende Bewehrungselemente konnten mangels Verfügbarkeit geeigneter Produkte nicht in Carbon bzw. als nichtmetallische Bewehrung realisiert werden:

- Die Zulagebewehrung für die Stabspannglieder zur Quervorspannung besteht aus Betonstahlbewehrung B500S, da innerhalb der Projektlaufzeit weder eine Anpassung der Allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung der verwendeten Stabspannglieder für die Verwendung von Carbonbewehrung im Verankerungsbereich möglich war, noch geeignete Formbewehrungen marktverfügbar sind.
- Als Transportanker wurden marktverfügbare Produkte aus Stahl verwendet, auch hier mangels Verfügbarkeit geeigneter nichtmetallischer Transportanker.
- Die Kappenbügel wurden aus Betonstahl B500S hergestellt, auch hier mangels Verfügbarkeit entsprechender stabförmiger nichtmetallischer Formbewehrung.

Als Vorspannelemente wurden jeweils CFCC12,5 der Fa. Tokyorope, Japan verwendet. Als schlaffe Bewehrung kamen ebene Bewehrungsmatten und Formbewehrungen der Fa. Solidian, Deutschland zur Anwendung.

Die Randfertigteile FT1 und FT5 sind jeweils identisch, die Mittelfertigteile FT2, FT3 und FT4 ebenfalls. Das erste Fertigteile des Überbaus wurde klassisch in Positivlage (Einbauposition) vollständig in Schalung hergestellt. Nach Erreichen der Zielfestigkeit und dem Ende der Nachbehandlung wurde die Vorspannung auf das FT übertragen. Anschließend wurde die Schalung einseitig zurückgebaut und durch das erste hergestellte Fertigteile ersetzt. D.h. für die vier folgenden Fertigteile fungiert an der Kontaktfläche zum vorhergehend hergestellten Fertigteile dieses auch als seitliche Schalung, siehe Bild 9 (links das geschützte, zuvor hergestellte FT, rechts das nächste FT unmittelbar vor dem Betoneinbau. Für die übrigen Schalflächen wurden keine Anpassungen vorgenommen.

Die Bewehrungskörper der Überbau-FT wurden vollständig außerhalb der Schalung hergestellt (siehe Bilder Bild 5, Bild 6). Zur Vermeidung etwaiger Probleme mit Kontaktkorrosion und zur Vermeidung lokaler Beschädigungen wurden die Einzelpositionen nicht wie sonst im Stahlbetonbau üblich mit metallischem Bindedraht fixiert, sondern mit Kunststoff-Kabelbindern. Bild 7 zeigt außerdem eine elektrisch nicht-leitende Zwischenlage aus Glasfaserbewehrung zwischen der Carbonbewehrung der Überbau-FT und den

Betonstahlzulagen an den Verankerungsstellen der Quervorspannung. Diese Maßnahme dient ebenfalls der Vermeidung etwaiger Kontaktkorrosion.

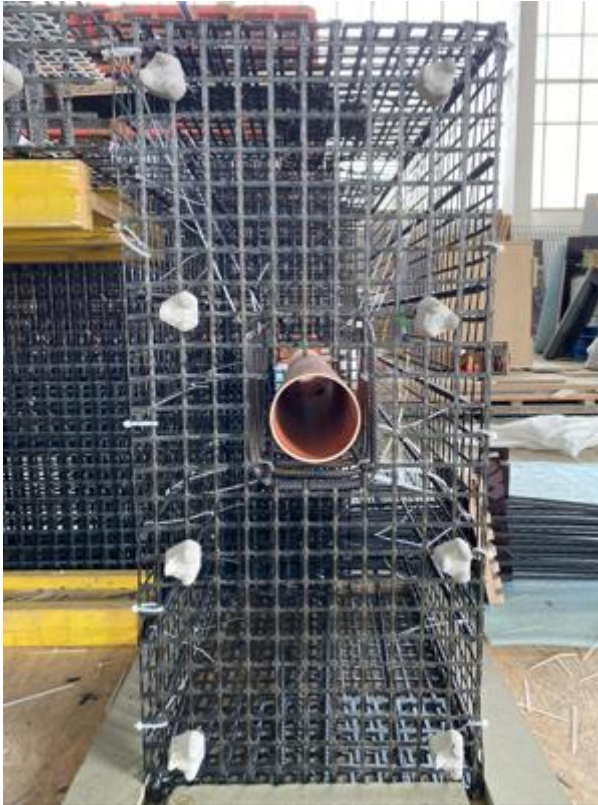
Der Bewehrungskorb wurde nach Vorfertigung und bereits inkl. der Hüllrohre für die Stabspannglieder der Quervorspannung in die Schalung gehoben (Bild 8). Nach Komplettierung der Einbauteile, der oberen Bewehrungslage und dem Vorspannen der Litzen entsprechend dem vorgegebenen Spannprogramm konnten die FT betoniert werden.

Als Beton kam entsprechend der Projektanforderungen ein C50/60 mit Größtkorn 8 mm zum Einsatz. Der Beton entspricht in seiner Zusammensetzung der DIN EN 206-1 in Verbindung mit DIN 1045-2 [50], [51]. Der Einbau des Betons erfolgte mit Betonierkübel. Zur Vermeidung von Betonentmischung endete der Schüttschlauch unmittelbar über der Bewehrung. Einbau und Verdichtung erfolgten in Lagen von > 30 cm. Für die Verdichtung des Betons kamen im unteren Querschnittsbereich ausschließlich Außenrüttler zur Anwendung, im Bereich der Fahrbahnplatte wurden unterstützend Innenrüttler mit kleinen Rüttelflaschen (ca. 25 mm) verwendet.

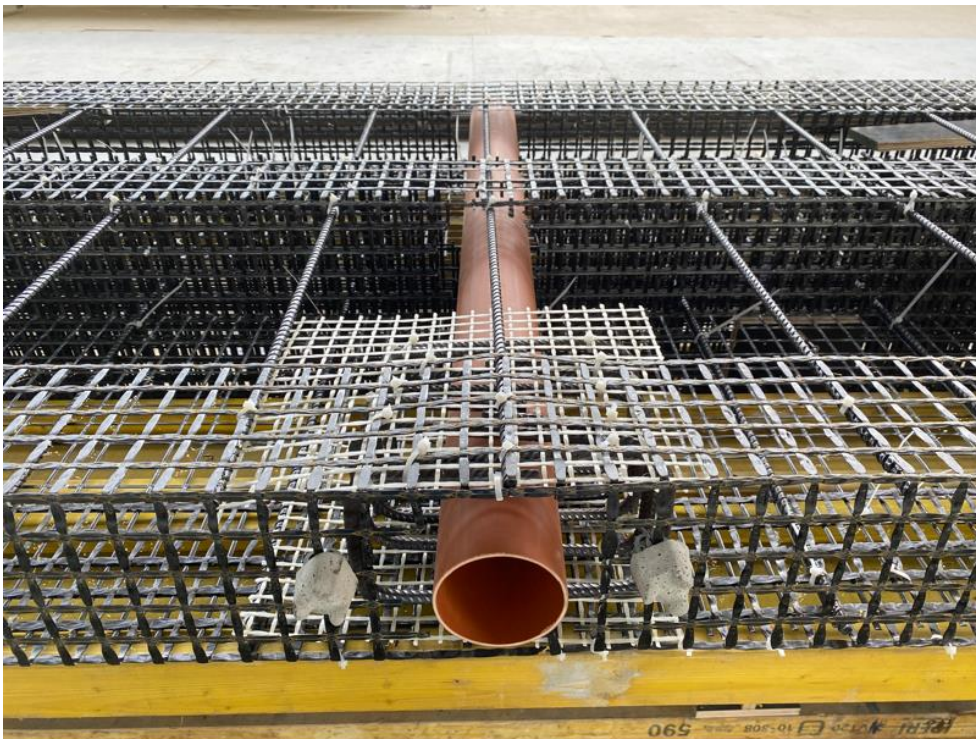
Die Nachbehandlung erfolgte entsprechend [47] in Verbindung mit [48] bzw. [45] in Verbindung mit [46] durch Belassen in der Schalung und Abdecken der nicht geschalteten Oberflächen mit Folie, siehe Bild 10.



**Bild 5:** Teilweise hergestellter Bewehrungskorb des FT5 vor dem Einheben in die Schalung



**Bild 6:** Detail Bewehrungskorb FT5 im Bereich Endquerträger



**Bild 7:** Detail Bewehrungskorb FT5 mit Trennlage zwischen Stahlbügeln (Zulage laut Zulassung für die Quervorspannung) zur Vermeidung von Kontaktkorrosion;



**Bild 8:** Bewehrungskorb beim Einheben in die Schalung

Die Dauer der Nachbehandlung hat eine ausreichende Hydratation des Betons in der Betonrandzone zum Ziel. Die Dauer richtet sich nach den Expositionsklassen. Entsprechend der planerischen Vorgaben muss der Beton im vorliegenden Fall bis  $0,70 \cdot f_{ck} = 42 \text{ MPa}$  nachbehandelt werden, siehe [48]. Maßgebend für die Dauer der Nachbehandlung ist hier aber die zu notwendige Umspannfestigkeit von  $\min f_{cm} = 55 \text{ MPa}$  vor dem Einleiten der Vorspannung. Die Dauer der Nachbehandlung bzw. der Umspannzeitpunkt wurden mit dem Reifegradverfahren nach *De Vree* ermittelt, siehe Bild 11. Die entsprechende Sensorik wurde im Untergurt außerhalb der Endquerträger platziert. Nach Ende der Nachbehandlung und (soweit relevant) wurden die FT jeweils für das Match-Cast-Verfahren des nächsten FT durch Trennmittelauftrag vorbereitet bzw. in das Freilager verbracht.



**Bild 9:** Blick in die Schalung unmittelbar vor Betoneinbau, seitliche Abschalung der Kontaktfläche durch vorher hergestelltes und geschütztes (Folienabdeckung) FT links im Bild



**Bild 10:** Nachbehandlung eines Überbaufertigteils

Projektdate	Kunde	Projekt	Nr.	Bauwerk   Bauteil				
	LASUV	PAMP	50-999-034	FT 1				
Betondaten	Betonsorte	Druckfestigkeitsklasse	Zielwert	Würfel Festigkeit beim Entschalen				
	FTW 701.5	C 50/60	55 N/mm <sup>2</sup>					
Messdaten	Beginn der Messung		Ende der Messung		Länge der Messung			
	17.05.2023 15:30		22.05.2023 06:30		4,6 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/mm <sup>2</sup>	-	-
Lufttemperatur	13,9	14,7	20,7	98,01	-	-	-	-
Litzenanker	20,1	37,1	55,6	18,0	32,2	58,6	20.05.2023 12:45	69,3 h

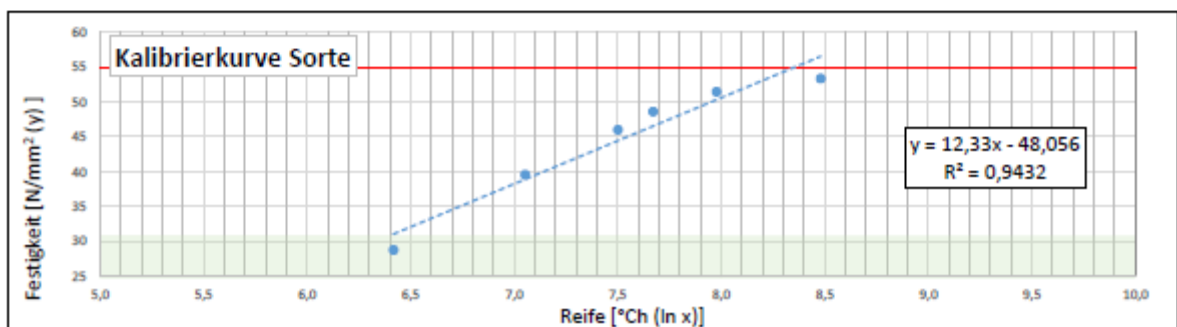
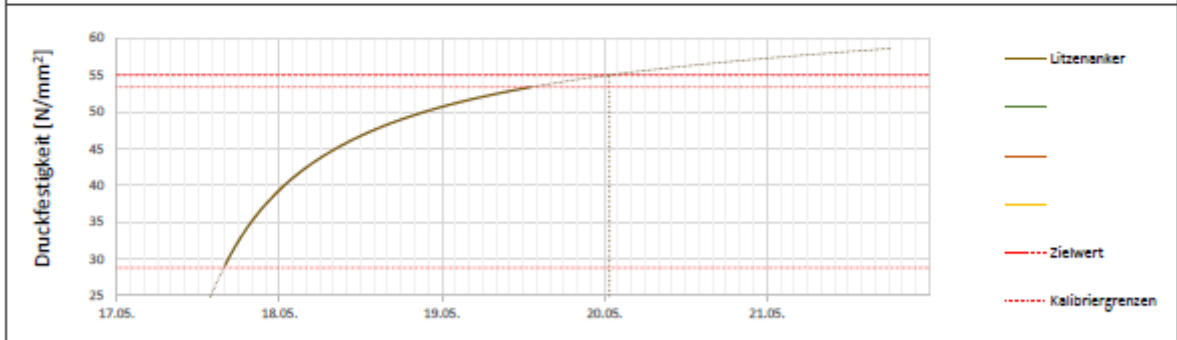
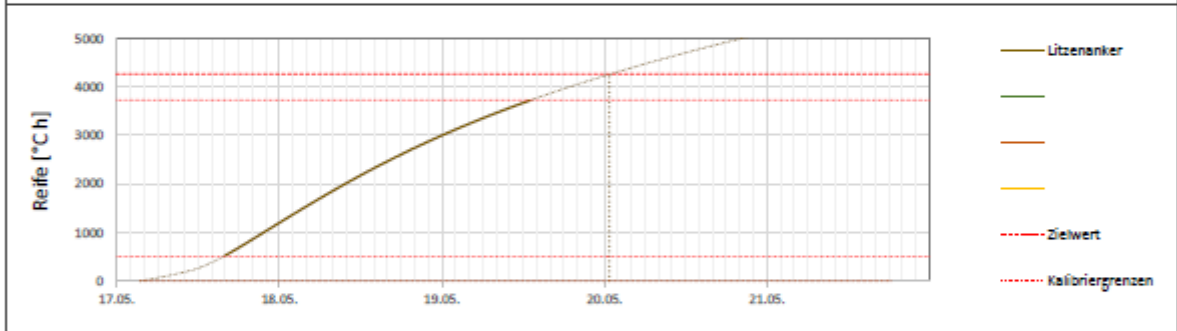
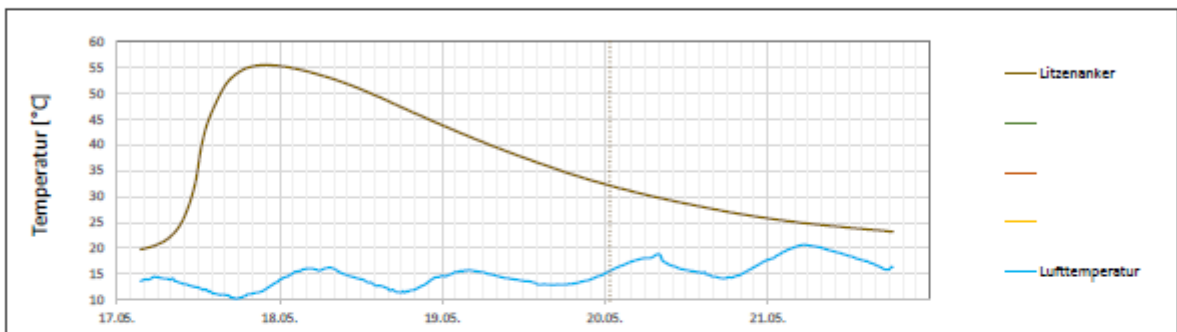


Bild 11: Protokoll der Reifegradprüfung eines Überbau-FT

## Ablauf der Montage

Auf dem Baufeld wurde seitens des Auftragnehmers für die bauzeitliche Umgehung das Planum hergestellt (Bild 12). Auf dem Planum wurden zunächst die Widerlager-FT aus Montagehilfslager aufgesetzt und höhenmäßig ausgerichtet (Bild 13). Nach dem Ausrichten wurde die planmäßige Vorspannung aufgebracht. Durch die vergleichsweise kurzen Spannanker bedingt musste die Spannpresse mehrfach den Zieldruck anfahren, um die Spannkraftverluste infolge der Nachgiebigkeiten der Verankerung auszugleichen und die Zielkraft sicher zu erreichen. Anschließend erfolgte der Verguss der Bodenfuge zur Herstellung eines vollflächigen Kontakts zwischen den FT und dem Planum mit einem üblichen Vergussbeton C30/37.



**Bild 12:** Situation auf dem Baufeld mit fertig gestelltem Planum vor Beginn der Montagearbeiten.



**Bild 13:** Montage der Widerlager-FT auf Planum/Sauberkeitsschicht.

Im nächsten Schritt erfolgte die Montage der Überbau-FT. Die Anlieferung erfolgte per LKW-Schwertransport über die Straße. Aufgrund des vorhandenen Längsgefälles fiel die Entscheidung zugunsten einer 2-Kran-Montage (Bild 14). Dies ist aufwendiger als eine 1-Kran-Montage (Kosten, Koordinierung, Platzbedarf auf dem Baufeld), hat aber den entscheidenden Vorteil, dass die Höhenlager der FT an beiden Widerlagern separat kontrolliert werden kann. Dies war in diesem Fall sehr hilfreich, da die FT so definiert am dem Widerlager abgesetzt werden konnten und mittels Kettenzug die Fuge bis auf ca. 1-2 mm geschlossen werden konnte (Bild 15). Dabei war der Kran unter signifikanter Last. Die vollständige Entlastung des Krans erfolgte erst, nachdem die Sollposition des jeweiligen FT erreicht war. Bei einer 1-Kran-Montage wäre diese Vorgehensweise wegen der fixen Länge der Gehänge nicht möglich gewesen. Entsprechend wäre auch die Lastverteilung zwischen Widerlager und Kran nicht oder nur teilweise einstellbar gewesen. Das selbstklebende Abdichtungsprofil in der Fuge zwischen jeweils zwei Überbau-FT wurden unmittelbar vor dem Absetzen des FT an seiner Sollposition eingebaut. Die Überbau-FT wurden auf vorab auf Höhe gebrachte Montagehilfslager abgesetzt. Die reine Montagezeit für die Überbau-FT betrug ca. 3 h (Bild 16).



**Bild 14:** Montage der Überbau-FT mit 2 Kränen.



**Bild 15:** Schließen der Kontaktfuge zwischen zwei Überbau-FT mittels Kettenzug, dabei ist der Kran noch nicht lastfrei.



**Bild 16:** Ansicht nach Montage der Überbau FT, vor Quervorspannung.

Nach der Montage der Überbau-FT wurden die Querspannglieder eingezogen und mittels hydraulischer Pressen entsprechend dem vorliegenden Spannprogramm vorgespannt.



**Bild 17:** Vorspannen der Stabspannglieder der Quervorspannung unter Aufsicht des Prüfsingenieurs, hier Kontrolle des Pressenweges.

Unmittelbar nach dem Vorspannen ist die volle Tragfähigkeit des Überbaus gegeben. Nachfolgend werden die weiteren Arbeiten bis zur Verkehrsübergabe aufgeführt:

1. Einbau des Korrosionsschutzes und der Endkappen an den Stabspanngliedern entsprechend der bauaufsichtlichen Zulassung;
2. Fahrbahnseitige Komplettierung des Dammes bzw. der Schottertragschicht durch Einschütten des Bauwerks einschließlich dem Versetzen der hergestellten und gelieferten Winkelstützwände zur Sicherung des Dammes;
3. Herstellen der gebundenen Trag- und Deckschicht des anschließenden Straßenbereiches durch das mit der Gesamtbaumaßnahme beauftragten Unternehmens;
4. Montage des Geländers auf den Randfertigteilen;
5. Installation eines Monitoringsystems aus den Auflagen der Zustimmung im Einzelfall. Das Monitoringsystem besteht aus
  - a. Verschiebungssensoren an den trockenen Fugen im Fahrbahnbereich;
  - b. Dehnmessstreifen zur Kontrolle der Vorspannkraft an ausgewählten Stabspanngliedern (Applikation der Dehnmessstreifen erfolgte bereits beim Einbau der Stabspannglieder);
  - c. Verteilte Faseroptische Sensoren, jeweils in der Zugzone zweiter Mittelfertigteile zur Erfassung von Änderungen der Vorspannung und einwirkender Belastungen sowie einem solchen Sensor in einem Mittelfertigteil in der oberen Betondeckung zur Erfassung der Quervorspannung und etwaiger Veränderungen;
  - d. Verkehrskamera mit Infrarotkamera (zur Wahrung des Datenschutzes, damit keine Fahrzeuge identifizierbar sind);

Das Monitoringsystem aus a) und b) wird durch den Vorhabenspartner HTW Dresden betrieben und zusammen mit den Daten aus d) ausgewertet. Entsprechende Angaben sind den Berichten der Vorhabenspartner zu entnehmen.

Für das Teilsystem d) des Monitorings lagen Konzeptionierung, technische Umsetzung, Betrieb und Auswertung beim ZE. Ausgewählte Ergebnisse sind weiter unten dargestellt.

6. Aufbringen der Fahrbahnmarkierung (durch Dritte, nicht durch den ZE oder Vorhabenspartner);
7. Durchführung einer Probelastung (**Bild 18**) entsprechend den Auflagen der Zustimmung im Einzelfall: Es wurden mehrere statische Laststellungen mit 2 voll beladenen 4-Achs-LKW sowie mehrere Überfahren mit 30 km/h und mit 50 km/h durchgeführt und messtechnisch erfasst.

Im September 2023 erfolgt die Verkehrsfreigabe des Pilotbauwerks. Der gesamte Verkehr der Bundesstraße 173 wurde bis November 2024 über das Bauwerk geleitet. Der planmäßige Rückbau erfolgte nach Abschluss der Baumaßnahmen an der B173 und nach Außerverkehrsetzung der bauzeitlichen Umfahrung Ende November 2024. Nach Demontage wurden alle Einzelteile des Bauwerks beim ZE eingelagert. Zum Zeitpunkt der Berichterstellung lagen bereits zwei Anfragen für weitere temporäre Einsätze vor, eine Einsatzentscheidung ist noch nicht gefallen.



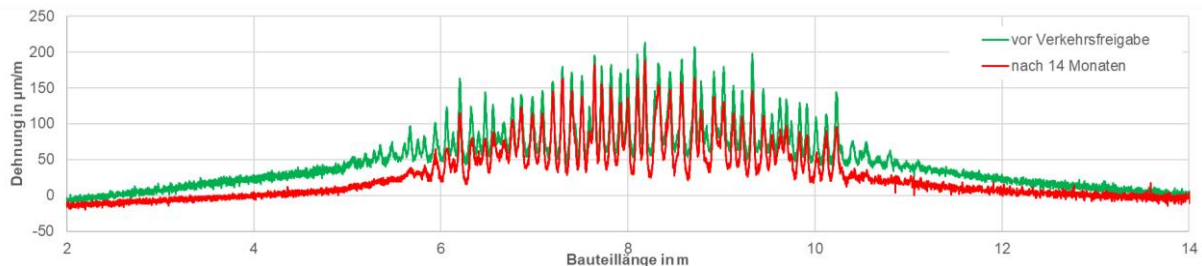
**Bild 18:** fertiggestelltes Pilotbauwerk während des Belastungsversuches vor Verkehrsfreigabe.

### **Ausgewählte Ergebnisse des Monitorings**

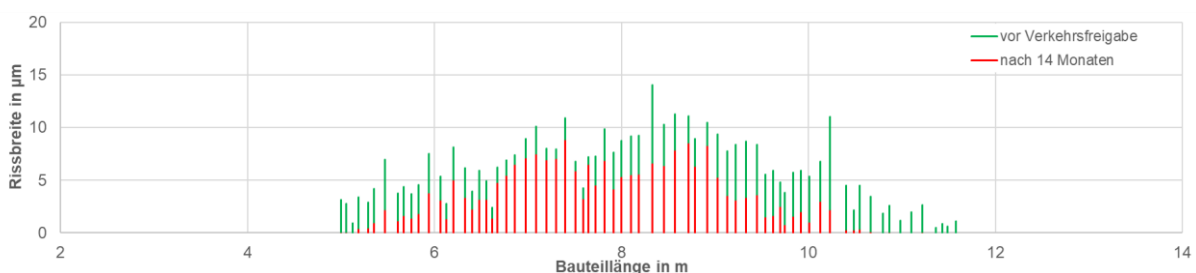
Bild 19 zeigt Dehnungsverläufe aus der Zugzone eines Mittelfertigteils. Der grün eingefärbte Verlauf zeigt Dehnungen unter der in Bild 18 dokumentierten Belastungssituation. Anhand der Dehnungsspitzen im positiven Bereich von ca.  $x = 6 \dots 10,5$  m ist eine fein verteilte Rissbildung zu erkennen. Bild 20 zeigt die aus dem Dehnungsverlauf durch Integration der Einflussbereich ermittelten Rissbreiten und die jeweiligen Risspositionen an. Die maximalen Rissbreiten von 0,015 mm (15  $\mu$ m) lassen sich so interpretieren, dass es sich hier um Risse handelt, die zu einem früheren Zeitpunkt entstanden sind, aber infolge der Vorspannung überdrückt sind. Es handelt sich also nicht um geöffnete Risse, sondern nur um ein „Atmen“ bereits vorhandener Risse. Eine weitere Analyse der Messdaten aus der Herstellphase (hier nicht dargestellt) weist die Rissbildung zweifelsfrei unmittelbar vor dem Aufbringen der Vorspannung nach.

Die in Bild 19 und Bild 20 rot eingefärbten Daten stammen von der Überfahrt eines einzelnen LKW unbekanntes Gewicht während der letzten Betriebstage vor dem Rückbau des

Bauwerks, 14 Monate nach Verkehrsfreigabe. Das Dehnungsniveau ist insgesamt geringer, was durch die Belastung mit nur einem LKW trotz unbekanntem Fahrzeuggewicht plausibel erscheint. Entsprechend geringer fallen auch die rechnerisch aus den Dehnungsdaten ermittelten Rissbreiten aus. Von Interesse ist hier vor allem die Tatsache, dass innerhalb der Nutzungszeit zu keinen neuen Rissen gekommen ist. Alle detektierten Risse stimmen exakt mit den Risspositionen aus dem Belastungsversuch vor Verkehrsfreigabe überein. Die Auswertung anderer Laststellungen nach 14 Monaten Nutzungszeit (hier nicht dargestellt) bestätigen das eindeutig.



**Bild 19:** Dehnungsverteilung mittels verteilter faseroptischer Sensoren während der Probelastung vor Verkehrsfreigabe und während einer LKW-Überfahrt am Ende der Nutzungszeit.



**Bild 20:** Risspositionen und Rissbreiten aus verteilter faseroptischer Sensorik während der Probelastung vor Verkehrsfreigabe und während einer LKW-Überfahrt am Ende der Nutzungszeit.

**Ziel: Bewertung der Bauweise und des konkreten Prototyps hinsichtlich Wirtschaftlichkeit und Praxistauglichkeit. (Aktivität 5.3.1)**

### **Ergebnis:**

Die Analyse und Aufarbeitung der Arbeitspakete AP1 bis AP4 unter dem Gesichtspunkten Wirtschaftlichkeit und Praxistauglichkeit hat zu folgender Bewertung geführt:

1. Die Herstellung im Match-Cast-Verfahren erfüllt die geometrischen Genauigkeitsanforderungen an die Kontaktflächen der Bauteile. Aus der Literatur bekannte Probleme wegen zeit- und lastabhängiger Verformungen des als Schalfläche benutzten, vorher hergestellten Bauteils infolge abfließender Hydratationswärme, Vorspannung, Kriechen und Schwinden konnten nicht festgestellt werden. Die Übertragbarkeit dieser Erkenntnisse auf andere Entwürfe (z.B. größere Spannweiten, höhere Vorspanngrade) kann mangels Erfahrung derzeit nicht beurteilt werden.
2. Die in die Kontaktfläche modellierte Verzahnung sollte als Zentrierhilfe während der Montage dienen. Die Ausführung hat gezeigt, dass eine solche Zentrierhilfe nicht notwendig ist und im Zweifel als Montageerschwerernis zu bewerten ist. Eine spürbare Erleichterung der Montage durch die angedachte Hilfe bei der Zentrierung und

- passgerechten Fügung konnte nicht festgestellt werden. Im Gegenteil war eine potentiell wirtschaftlichere Ein-Kran-Montage u.a. wegen der Profilierung nicht möglich.
3. Bei der Demontage (nach Ende des Förderzeitraums) führte die Verzahnung teils zu erheblichen Schwierigkeiten. Es wird daher empfohlen, auf die Verzahnung bei zukünftigen Anwendungen zu verzichten. Sie ist auch statisch nicht erforderlich, da sämtliche quer zur Fuge wirkenden Kräfte an der vorgespannten Trockenfuge über Reibschluss und nicht über Formschluss abgetragen werden. Es sei aber angemerkt, dass die Pilotvorhaben planmäßig nur für eine einmalige Verwendung geplant wurde.
  4. Der wesentliche Vorteil gegenüber herkömmlichen Massivbauweisen und anderen Schnellbausystemen ist der völlige Verzicht auf Nassprozesse (d.h. frischer Beton und damit verbundene Abhängigkeiten wie Temperaturabhängigkeit, notwendige Aushärte- und Nachbehandlungszeiten bis zur Belastbarkeit). Das Pilotvorhaben hat gezeigt, dass ein solches Bauwerk mit geringen Anpassungen sicher innerhalb eines Tages aufgebaut werden kann und mit Abschluss der Montage einen voll tragfähigen Überbau besitzt. Etwaige Mehrkosten infolge der hohen Transport- und Montagegewichte sowie der aufwändigen Quervorspannung müssen im Einzelfall mit den Konsequenzen
  5. Eine Nachkontrolle der Aufwendungen zeigt, dass die Bauweise i.d.R. kostenintensiver sein wird als klassische Behelfsbrücken aus Stahl, soweit rein die nutzungsbezogenen Kosten inkl. Aufbau, Vorhaltung und Rückbau betrachtet werden. Dies wird mit den höheren Transportgewichten und entsprechend notwendigen größeren Kranen für
  6. Aussagen zur Wirtschaftlichkeit bei wiederholter Verwendung lassen sich derzeit nicht beziffern oder bewerten, da die Aufwendungen derzeit mangels Erfahrung nicht bewertet werden können. Derzeit ist unbekannt, welche Aufwendungen infolge von Sanierungen an den Betonbauteilen vor einem wiederholten Einsatz regelmäßig anfallen oder ob ein bestimmter Schädigungsgrad eine weitere Verwendung unwirtschaftlich erscheinen lässt.

Derzeit wurden folgende **ungelösten Teilprobleme** identifiziert:

1. *Dauerhaftigkeit und Akzeptanz der tatsächlich ausgeführten Detaillösung:*  
Die umgesetzte Lösung weicht in folgenden Punkten vom aktuell gültigen Regelwerk für Bundesstraßen ab: direkt befahrene Fahrbahn ohne Abdichtung, keine durchgehende 20 cm dicke Ortbetonplatte, nichtmetallische Bewehrung (Carbon) für die schlaffe Bewehrung und für die Längsvorspannung des Überbaus, kein monolithische Endquerträger, keine Lagerkonstruktion entsprechend Regelwerk (insbesondere fehlende Inspizierbarkeit der Lagerkonstruktion), Trockenfuge ist erdseitig und potentiell fahrbahnseitig (bei Ausführung von Abdichtung und Fahrbahnbelag) nicht inspizierbar; -- aktuell kann nicht eingeschätzt werden, welche der genannten Punkte bei der Straßenbauverwaltung des Bundes und der Länder für eine wiederholte Anwendung akzeptiert werden.
2. *Wiederverwendbarkeit von Transportankern:*  
Transportanker sind in der DGUV Regel 101-001 [60] geregelt. Aktuell dürfen Transportanker nicht wiederholt verwendet werden. Konkret ist mehrfaches Anschlagen innerhalb der Transportkette bis Einbau eines Fertigteils zulässig. Ausgenommen sind Transportanker in Übereinstimmung mit dem Zulassungsbescheid „Nichtrostende Stähle“ (Zulassungsnummer 7-30.44.1) [61]. Transportanker, die diese Anforderungen erfüllen sind in dem benötigten Lastbereich aktuell nicht marktverfügbar.
3. *Passgenauigkeit bei abweichenden Randbedingungen:*  
Derzeit kann nicht bewertet werden, in welchen Umfang von der Hydratationswärme ausgehende, bekannte temperaturbedingte Probleme beim Match-Cast-Verfahren [62] bei feldlangen Fertigteilen praktisch relevant werden. Bei der vorliegenden

Konstruktion kommt es weiterhin zu Überlagerungen mit Last- und zeitabhängigen Verformungen infolge Vorspannung. Beim Pilotvorhaben wurde dem durch eine sehr moderate Vorspannung Rechnung getragen. Im Interesse der W

Folgende **Optimierungsmöglichkeiten** wurden identifiziert:

1. Verzicht auf Profilierungen der Kontaktfläche (mit Ausnahme des Abdichtungsprofils);
2. Verringerung der Bauteilgewichte durch Realisierung größerer Schlankheiten und geringerer Bauteilabmessungen;
3. Vollständiger Verzicht auf Nassprozesse auf der Baustelle (hier Lagerverguss an den Endquerträgern, Verguss der Ausgleichsschicht unterhalb der Widerlager-FT);
4. Korrekte Berücksichtigung der Teileinspannung des eingeschüttetem Bauwerks und Vermeidung unkontrollierter Rissbildung im Überbau;

Folgende **Forschungsfragen** wurden identifiziert:

1. *Dauerhaftigkeit direkt befahrbare Fahrbahnen:* Betonfahrbahnen stark befahrender Straßen weisen i.d.R. eine Lebensdauer von ca. 30 Jahren auf, werden aber üblicherweise als Beton geringerer Druckfestigkeit hergestellt. Unbekannt ist derzeit, ob Hochleistungsbetone ( $f_{ck} > 50/60$ ) als direkt befahrender Fahrbahnbelag zielsicher eine Lebensdauer erreichen können, die der des Überbaus entspricht. Nur unter diesen Voraussetzungen wäre nach Ansicht des ZE direkt befahrene Überbau-FT technisch und wirtschaftlich sinnvoll.
2. *Geometrie des offenen Fugenbereichs zwischen den Überbau-FT:* Unter Fachleuten ist bekannt, dass offene Fugen zwischen Betonteilen nur über eine begrenzte Dauerhaftigkeit verfügen und degradieren können. Bekannt ist, dass kleinere Fugen (z.B. Breite 1 mm) dauerhafter sind als breitere Fugen (z.B. 10 mm). Insbesondere Kantenabbrüche durch mechanische Beanspruchung und Frostschäden werden als Degradationsgründe genannt. Im Rahmen der Projektbearbeitung gelang es nicht, belastbare Aussagen zur Gestaltung derartiger Fugen für Brücken zu identifizieren.

## **2. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises**

Siehe separaten zahlenmäßigen Nachweis.

## **3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit**

Die Notwendigkeit der Arbeiten ergab sich aus dem Entwicklungsstand bezüglich vorgespannter Trockenfuge und Vorspannung von Carbonelementen mit sofortigem Verbund im Fertigteilwerk des ZE, dem Stand des Wissens anhand der zugänglichen Fachliteratur und den Ergebnissen des Vorhabens C3-V2.9. Ein geeignetes Fertigungsverfahren für vorgespannte Trockenfugen ohne weitere Bearbeitungsschritte ist ein wichtiger Schritt hinsichtlich breiter praktischer und wirtschaftlicher Anwendung diese Fügeverfahrens für Betonbauteile. Die zielsichere Übertragung der Spannkraft auf das Carbonelemente ist wesentliche Voraussetzung für die Umsetzung der Vorspanntechnologie. Eine kompakte Einrichtung zur Übertragung der Spannkraft auf das Carbonelement ist Voraussetzung für die technische Eignung in der Baupraxis, eine Wiederverwendbarkeit der Einrichtung ist Voraussetzung für die baupraktisch wirtschaftliche Anwendung. Die Einrichtung zur

Kraftübertragung auf das Carbonelemente zählt damit zusammen mit entsprechenden Bemessungs- und Konstruktionsregeln zu den wesentlichen technisch-technologischen Voraussetzungen für Hersteller von Betonfertigteilen, um Produkte aus vorgespanntem Carbonbeton am Markt erfolgreich anbieten zu können.

Ausgangspunkt für die vorgespannte Trockenfuge waren umfangreiche Vorarbeiten des Vorhabenspartners HTW Dresden mittels Laborversuchen. Der erarbeitete Sachstand zeigt grundsätzlich die Umsetzbarkeit der Vorspanntechnologie mit Trockenfugen auf. Er gibt Hinweise für die Bemessung und Konstruktion von vorgespannten Trockenfugen. Die Erkenntnisse können durch den Vorhabenspartner HTW Dresden genutzt werden. Beim ZE ist der praktische Nachweis über die zielsichere Anwendung des Fertigungsverfahrens Ausgangspunkt für konkrete Produktentwicklungen, ggf. auch für die Bewerbung um am Markt nachgefragte Projekte.

Die im Vorhaben erarbeiteten Ergebnisse sind eine wesentliche Grundlage für Folgeprojekte des ZE zur Entwicklung marktfähiger Produkte. 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.

Ein mittelbarer wirtschaftlicher Nutzen entsteht für Hentschke Bau durch die Verwendung der erarbeiteten Erkenntnisse in Folgeprojekten bzw. Produktentwicklungen. Zum Zeitpunkt der Berichterstattung liegt bereits eine Anfrage der Straßenbauverwaltung für eine erneute Verwendung des Piloten als temporäre Brücke vor, die derzeit ernsthaft auf Umsetzbarkeit geprüft wird. Es entsteht eine verbesserte Ausgangslage für weitere anwendungs- und marktorientierte unternehmensbegleitende Auftragsforschung bzw. sogar für die direkte Anwendung und Produktentwicklung im Bereich modularer Brücken.

**Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten:** Die Ergebnisse des Teilvorhabens weisen nach, dass vorgespannte Trockenfugen mit geeigneten Herstellverfahren auch ohne aufwändige Oberflächenbearbeitung technisch umsetzbar sind. Außerdem kann die Vorspannung von Carbonlitzten im sofortigen Verbund in der praktischen Anwendung als erprobt und geeignet angesehen werden. Die benannten Fragestellungen sollen in Folgeprojekten mit geeigneten Vorhabenspartnern 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:**

1. Schaarschmidt, D.; Jesse, F.; Flederer, H.: Schnell errichtet – Vollmodulare Straßenbrücke aus Carbonbeton. In: 16. Carbonbetontage, 24.-25.09.2024, Dresden.

– online: [https://carbonbetontage.de/wp-content/uploads/2024/11/C3\\_Tagungsband\\_FINAL-komprimiert1.pdf](https://carbonbetontage.de/wp-content/uploads/2024/11/C3_Tagungsband_FINAL-komprimiert1.pdf)

2. Schaarschmidt, D.; Putz, J.; Jesse, F.; Flederer, H.; Bösche, Th.: Prototyp einer vollmodularen Straßenbrücke – Adaptiv, reversibel und sofort tragfähig durch vorgespannte Trockenfugen. In: *Bautechnik* **101** (2025) 2 – DOI:10.1002/bate.202400068 (zur Veröffentlichung angenommen)

**Geplante Veröffentlichungen:**

1. Schnelles Bauen mit modularen Brücken (Arbeitstitel)

**IV. Anlage: kurzgefasster Erfolgskontrollbericht (wird nicht veröffentlicht)**

separates Dokument.

- V. 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.

## Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN --	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht
3. Titel Verbundvorhaben: PAMB – Pilotanwendung modularer Brückenbau: Erprobung modularer, nichtmetallische bewehrter Überbauten unter realen Einsatzbedingungen; Teilvorhaben: Industrielle Fertigung	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Jesse, Frank	5. Abschlussdatum des Vorhabens 30.04.2024
	6. Veröffentlichungsdatum 23.12.2024
	7. Form der Publikation Bericht
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Hentschke Bau GmbH Zeppelinstraße 15 02625 Bautzen	9. Ber. Nr. Durchführende Institution --
	10. Förderkennzeichen 03LB2031C
	11. Seitenzahl 28
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) 53170 Bonn	13. Literaturangaben 61
	14. Tabellen 0
	15. Abbildungen 20
16. Zusätzliche Angaben -/-	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum) Schlussbericht: II. Eingehende Darstellung, Bautzen, 23.12.2024	
18. Kurzfassung Ziel des Vorhabens waren Planung und Realisierung eines modularen Pilotbauwerks mit Fertigteilen unter Verwendung von Carbonbewehrungen mit Vorspannung im sofortigen Verbund. Im theoretischen Teil wurden die Planungen des Pilotbauwerks der Vorhabenpartner auf praktische Umsetzbarkeit geprüft und Optimierungshinweise in den Planungsprozess eingespeist. Im praktischen Teil wurde ein Pilot einer vollmodularen Brücke realisiert und im Zuge einer Bundesfernstraße unter Verkehr genommen. Besonderheiten der modularen Brücke sind mit Carbon bewehrte und vorgespannte Überbaufertigteile. Die feldlangen Fertigteile sowie in Fertigteilbauweise hergestellte Widerlager sind mittels vorgespannter Trockenfuge gefügt. Die Konstruktion erlaubt durch Verzicht auf Nassprozesse einen sehr schnellen Baufortschritt. Der Überbau ist unmittelbar nach Abschluss der Montage voll belastbar. Der Bericht fasst die wesentlichen Ergebnisse anschaulich zusammen.	
19. Schlagwörter Modulare Brücken, vorgespannte Trockenfuge, Carbonbeton, Vorspannung im sofortigen Verbund	
20. Verlag --	21. Preis --

## Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN --	2. type of document (e.g. report, publication) Final Report
3. title Verbundvorhaben: PAMB – Pilotanwendung modularer Brückenbau: Erprobung modularer, nichtmetallische bewehrter Überbauten unter realen Einsatzbedingungen; Teilvorhaben: Industrielle Fertigung	
4. author(s) (family name, first name(s)) Jesse, Frank	5. end of project 30.04.2024
	6. publication date 23.12.2024
	7. form of publication Report
8. performing organization(s) (name, address) Hentschke Bau GmbH Zeppelinstraße 15 02625 Bautzen	9. originator's report no. --
	10. reference no. 03LB2031C
	11. no. of pages 28
12. sponsoring agency (name, address) Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) 53170 Bonn	13. no. of references 61
	14. no. of tables 0
	15. no. of figures 20
16. supplementary notes --	
17. presented at (title, place, date) Schlussbericht: II. Eingehende Darstellung, Bautzen, 23.12.2024	
18. abstract The aim of the project was to plan and implement a modular pilot structure with prefabricated elements using carbon reinforcement with pre-stressing. In the theoretical part, the plans of the pilot structure from project partners were checked for practical feasibility and optimization tips were fed into the planning process. In the practical part, a pilot of a fully modular bridge was realized and put into traffic as part of a federal highway. Special features of the modular bridge are carbon-reinforced and pre-stressed superstructure made of prefabricated elements. The field-long prefabricated elements and abutments manufactured using prefabricated construction are joined using a pre-stressed dry joint. The design allows for very rapid construction progress by avoiding wet processes on site. The superstructure can be fully loaded immediately after assembly is completed. The report clearly summarizes the main results.	
19. keywords Modular bridges, pre-stressed dry joints, carbon concrete composites, pre-stressing carbon concrete	
20. publisher --	21. price --