

Untersuchung neue Werkstoffe

Gestaltungsleitfaden Carbon- und Textilbeton

Planen, Bauen, Betreiben

DB InfraGO AG

Zukunftsinitiative Bahnbau
Produktivität & Innovation

ZIB-Team „Baustoffe der Zukunft“

München, den 20.11.2024

„Baustoffe der Zukunft“

Gestaltungsleitfaden Textil- und Carbonbeton:

Allgemeine Arbeitsgruppe:

Die Arbeitsgruppe setzt sich zusammen aus 13 Vertretern der DB InfraGO AG, KIBAG, LEUBE, MKP, Kleihues, König Bau, CBING, C³, RWTH Aachen, TU Dresden, EPFL Lausanne, MKIngenieure, FOLAB)

Die Unterlage wurde extern geprüft von:

Prof. em. Dr. Eugen Brühwiler
EPFL - ETH Lausanne
beratender Ingenieur
Schweiz

Das Vertiefungsdokument wurde erstellt von:

RWTH Aachen:
Annette Dahlhoff

MK Ingenieure:
Dr.-Ing. Till Büttner

CBIng:
Dr.-Ing. Steffen Schröder

C³:
Dr.-Ing. Frank Schladitz

Alle Dokumente wurden durch die DB InfraGO AG begleitet und geprüft:

Grundsätze Infrastrukturplanung und -projekte - Abteilung Baukapazität, Umwelt und Logistik:
I.IIG 41: Conrad Pelka

Bauartenverantwortung Ingenieurbau - Brückenbau und LS-Anlagen Technik
I.IAI 31: Tristan Mölter
I.IAI 31: Peter Dul

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	4
1.1 Vorstellung des Werkstoffs.....	4
2 Einsatzgebiete	6
2.1 Planungsprozess und Technologie	6
2.2 Schnelles Bauen	6
2.2.1 Bauablauf und Bauzeit	6
2.2.2 Bahnbetrieb.....	6
2.2.3 Bahninfrastruktur.....	7
2.3 Wartung und Betrieb	7
2.3.1 Dauerhaftigkeit.....	7
2.3.2 Erfordernis von Erneuerungen	7
2.3.3 Wartungszyklen.....	8
3 Chancen für Ökologie, Ökonomie und Soziales	9
3.1 Nachhaltigkeitsanalyse	9
3.1.1 CO2 Vergleich.....	9
3.1.2 Kreislaufwirtschaft.....	9
3.2 Kosten.....	9
3.3 Soziales	10
4 Risikobewertung	11
5 Anwendungsbeispiele	12
5.1 Kevag Viadukt.....	16
5.2 Eisenbahnüberführung Großschwabhausen	18
6 Literaturverzeichnis	22

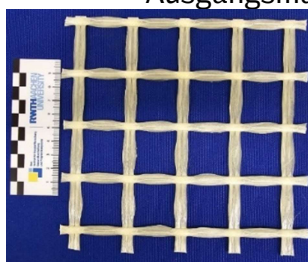
1 Einleitung

1.1 Vorstellung des Werkstoffs

Textilbeton ist ein innovativer Verbundwerkstoff, der im Gegensatz zu Stahlbeton aus einer nicht-metallischen Bewehrung auf Basis von Hochleistungsfasern wie Glas-, Carbonfasern oder auch Aramidfasern in Stab- oder Gitterform und einer Betonmatrix besteht. Die Bewehrung wird dabei aus Tausenden von einzelnen Fasern (Filamenten) zu sogenannten Rovings gebündelt und mittels Polymeren getränkt. Diese Tränkung erfüllt mehrere Zwecke, darunter den Schutz der Filamente, die Steigerung der Traglast und die Verbesserung der Verarbeitbarkeit. Je nach verwendetem Tränkungsmaterial können die resultierenden Materialien steif oder flexibel sein. Darüber hinaus können sie durch eine Epoxidharzbeschichtung mit Quarzsand oberflächenmodifiziert werden, um den Verbund zur Betonmatrix weiter zu verbessern [1-4].



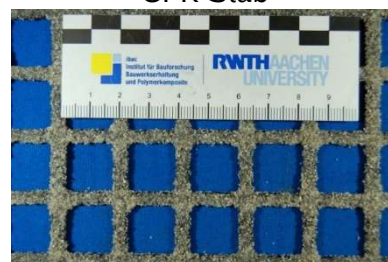
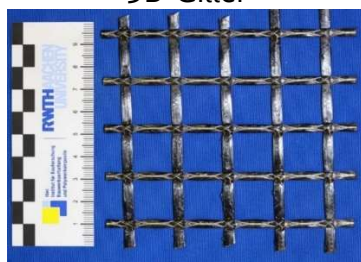
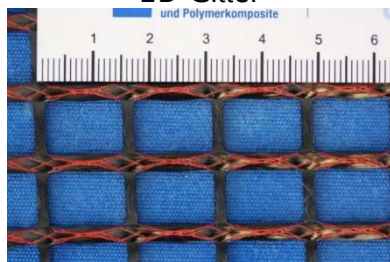
Ausgangsmaterialien Fasern (links Glasfaser, rechts Carbonfaser)



2D-Gitter

Bewehrungsgeometrien
3D-Gitter

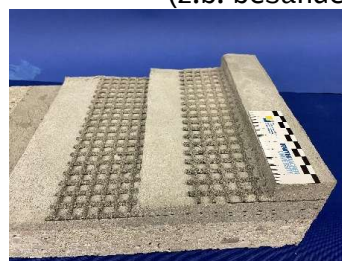
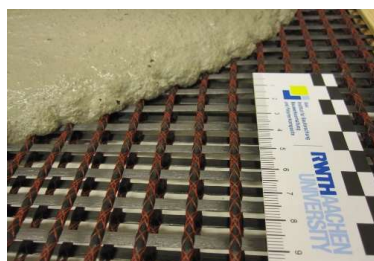
CFK-Stab



Weich getränkt

Steif getränkt

Oberflächenmodifiziert
(z.B. besandet)



Materialkombination technisches Textil mit Feinbetonmatrix

Abbildung 1: Nicht-metallische Bewehrungen (Fotos: Cynthia Morales Cruz, Annette Dahlhoff, Frank Schladitz)

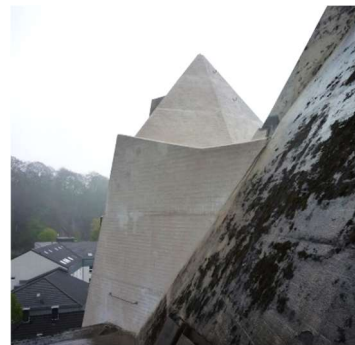
Heutzutage werden nicht-metallische Bewehrungen auf Robotern und Textilmaschinen hergestellt. Textilbeton mit Carbonfasern, auch Carbonbeton genannt, bietet zahlreiche Vorteile gegenüber

herkömmlichem Stahlbeton. Eine herausragende Eigenschaft ist die hohe Zugfestigkeit von bis zu 4200 N/mm² – etwa achtmal höher als Betonstahl. Durch die nicht-metallische, korrosionsfreie Bewehrung sind Textilbetonbauteile besonders langlebig, selbst unter extremen Bedingungen wie Chloridbelastung bei Brücken und Parkhäusern. Dadurch können Betondeckungen reduziert und schlanke, ressourcenschonende Konstruktionen realisiert werden. Die geringe Dichte der Bewehrung erleichtert zudem den Einbau. Carbonfasern sind außerdem elektrisch leitfähig, was eine Funktionalisierung, z. B. als Anode im kathodischen Korrosionsschutz, ermöglicht.

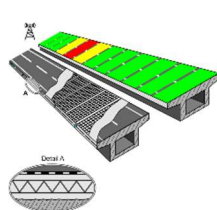
Textilbeton weist eine optimale Rissverteilung auf, was zur Dauerhaftigkeit beiträgt und vielfältige Anwendungen, auch in der Sanierung von Bauwerken, ermöglicht. Da dünnwandige, langlebige Konzepte besonders im Bestand gefragt sind, wird Textilbeton für eine verlängerte Nutzungsdauer von Stahlbetonkonstruktionen eingesetzt. Zur Ausführung sind oft Einzelgenehmigungen erforderlich, unterstützt durch die DAfStb-Richtlinie „Betonbauteile mit nicht-metallischer Bewehrung“. Seit 2023 besteht für die Verstärkung von Tragwerken im Innenbereich mit Carbonbeton eine allgemeine Zulassung des DIBt für das System CARBOrefit®. Für wasserbauliche Instandsetzungen dient das BAW-Merkblatt „MITEX“ als Leitfaden.



Mörtelbasiertes, textilbewehrtes Abdichtungssystem für gemauerte Gewölbebrücken /11/



Instandsetzung der Wallfahrtskirche Mariendom als flächig applizierte Mörtelschutzschicht mit rissverteiler Wirkung /3, 12/



Multifunktionales Verstärkungs- und Schutzsystem aus textilbewehrtem Hochleistungsmörtel für Brückenbauwerke (SMART-Deck) /7, 8/



Instandsetzung des Wehr Horkheim als dauerhafter Schutz der Bauwerks Oberfläche mit gleichzeitiger Rissüberbrückungsfähigkeit /13, 14/

Abbildung 2: Textilbeton in der Praxis - beispielhafte Pilotprojekte

2 Einsatzgebiete

2.1 Planungsprozess und Technologie

Der neuartige Baustoff Carbonbeton hat die Phase der wissenschaftlichen Entwicklung weitgehend absolviert. In einer Reihe von Baumaßnahmen wurde Carbonbeton bereits angewendet und das große Potenzial insbesondere bei der Verstärkung von Bauwerken im Verkehrssektor bzw. im Hochbau aufgezeigt. Hier befindet sich die Bauweise auf dem direkten Weg vom Stand der Wissenschaft zum Stand der Technik.

Carbonbeton wurde bereits mehrfach für die Verstärkung von Bauwerken erfolgreich angewendet. Für den Einsatz im Hochbau liegt hierfür die o.g. abZ vor, beim Einsatz im Verkehrsbereich bedingt die Anwendung aktuell einer objektspezifischen ZiE. Für eine potentielle Verstärkung der im Bestand der DB AG vorhandenen typisierten Bauwerke mit spannungsrissegefährdeten Spannstählen ist die Erlangung einer vorhabenbezogenen ZiE bzw. allgemeine bauaufsichtliche Zulassung erstrebenswert.

Entscheidende Vorteile von Verstärkungen mit Carbonbeton sind zum einen die sehr geringen Auftragsdicken und zum anderen die Anpassungsfähigkeit an bestehende Bauwerke und die damit verbundenen individuellen Herausforderungen. Gemäß [15] fallen „1.004 Eisenbahnbrücken – das sind lediglich 4 Prozent – (fallen) in die Zustandskategorie 4, was bedeutet, dass bei diesen Bauwerken eine wirtschaftliche Instandsetzung nicht mehr gegeben ist. Hier ist es sinnvoller, die Brücke komplett zu ersetzen.“ Dementgegen steht, dass eine Verstärkung mittels Carbonbeton von Brücken in der Zustandskategorie 4 eine wirtschaftliche Instandhaltung bzw. die wirtschaftliche Herstellung der Verfügbarkeit auch bei Lasterhöhung darstellen. Damit einhergehend ist eine finanzielle Neubewertung der Zustandskategorie 4 erforderlich.

2.2 Schnelles Bauen

2.2.1 Bauablauf und Bauzeit

Die Applikation von Textil- sowie Carbonbeton unterscheidet sich im Wesentlichen nicht von der Applikation eines Gradientenausgleichs auf der Bauwerksobenseite sowie eines flächig zu applizierenden Instandsetzungsmörteln auf der Ober- oder Unterseite von Bauwerken. Die Vorgaben der Regelwerke TR Instandhaltung des DIBts sowie ZTV-ING der BAST bzw. ZTV-W LB 2019 der BAW gelten für die Verarbeitung von zementösen Instandsetzungsprodukten gleichermaßen auch für Textilbetone [10, 16-18].

Gegenüber polymerbasierten flächigen Systemen haben Textilbetone den wesentlichen Vorteil, dass Textilbetone deutlich witterungsunabhängiger verarbeitet werden können, da Textilbetone auch bei hohen Luftfeuchtigkeiten appliziert werden können. Die für die Applikation erforderlichen Temperaturen von Textilbetonen liegen zwischen 5° C und 30 °C. Textilbewehrte Instandsetzungssysteme erfordern in Abhängigkeit der verwendeten Mörtelsysteme i.d.R. fünf Tage Nachbehandlung mittels Feuchthalten [18].

In der Regel handelt es sich bei den für Textilbeton verwendeten Mörteln um hochfeste Mörtel, die eine vergleichsweise schnelle Festigkeitsentwicklung aufweisen, so dass in Abhängigkeit der Witterungsbedingungen nach Abschluss der Nachbehandlung auch die weiteren Arbeitsschritte folgen können. Im Rahmen von Einzelfallbetrachtungen kann gegebenenfalls deutlich früher als vor Abschluss der Nachbehandlung eine Belastung des Textilbetons z.B. mit Gleisschotter erfolgen.

2.2.2 Bahnbetrieb

Die Applikation von Textilbeton kann sowohl unter Bahnbetrieb als auch ohne Bahnbetrieb auf Bauwerken realisiert werden. Die für Textilbetone typischen Übergreifungsstöße der Bewehrung liegen zwischen 20 und 50 cm und aufgrund der vergleichsweise flexiblen textilen Bewehrung kann unter Berücksichtigung der maximalen Biegeradien der Bewehrung diese auch in unterschiedlichen Bauabschnitten gestoßen werden [1, 19].

Bei der Ausführung von Textilbetonen unter Bahnbetrieb sind die Expositionsclassen des Mörtels entsprechend zu wählen, insbesondere muss der Mörtel für den Einsatz bei der Expositionsclassenklasse XDYN gemäß TR Instandhaltung geeignet sein.

2.2.3 Bahninfrastruktur

Textilbetone zeichnen sich durch eine geringe Dicke und Aufbauhöhe aus. Damit kann in Abhängigkeit der technischen Anforderungen bei typischen Anwendungsfällen von Schichtstärken der Textilbetonschicht zwischen 20 und 35 mm ausgegangen werden [1, 3]. Eine Beeinträchtigung vorhandener Gradienten kann mit den geringen Aufbauhöhen vermieden werden. Ferner weist die textile Bewehrung eine hohe Flexibilität auf, so dass auch eine Anpassung an komplexe Bauwerksgeometrien – siehe Anwendungsbeispiel „Kevag-Viadukt“ – vergleichsweise einfach realisiert werden können.

2.3 Wartung und Betrieb

2.3.1 Dauerhaftigkeit

Grundsätzlich wird bei Carbonbeton derzeit von Nutzungsdauern von bis zu 200 Jahren gesprochen, da bei textilen Bewehrungsmaterialien insbesondere Carbonfaser keine Korrosionsschäden auftreten [1]. Dabei erfordert jedoch das breite Anwendungsspektrum von textilbewehrtem Carbonbeton eine genaue Betrachtung der mechanischen Belastungen zur Rissbildung und Umwelteinflüssen, die auf die Dauerhaftigkeit eines Bauteils einwirken können. Besonders entscheidend ist es, dabei die Tragfähigkeit und Langlebigkeit unter spezifischen Bedingungen des Bahnbetriebs zu gewährleisten.

Ein zentrales Thema bei der Sicherstellung der Dauerhaftigkeit von Bauteilen ist die Rissbildung. Risse in Beton erhöhen den Transport von Flüssigkeiten und Gasen in den Beton, welche Degradationsprozesse beschleunigen kann. Selbst eine einmalige Überlastung, eine zyklische Beanspruchung oder hohe Langzeitlasten können das Rissverhalten von Carbonbeton negativ beeinflussen, indem sie zu größeren und häufiger auftretenden Rissen führen. Dabei ist es wichtig zu beachten, dass Risse nicht immer infolge mechanischer Belastungen entstehen. Thermische Deformationen, behindertes Trocknungsschwinden oder autogenes Schwinden können ebenfalls Rissbildung verursachen, die durch zyklische Belastungen weiter verschärft werden können.

Diese Phänomene sind generell die gleichen wie auch bei stahlbewehrten Betonbauteilen bekannt, jedoch bietet Carbonbeton hier entscheidende Vorteile. Ein herausragender Vorteil von Carbonbeton besteht in der Kontrolle der Rissbreiten. Im Vergleich zu herkömmlichem stahlbewehrtem Beton bleiben die Rissbreiten bei Carbonbeton wesentlich kleiner, was eine deutliche Reduktion des Schadstoffeintrags ermöglicht. Im Bereich der Instandsetzung bei der Kombination von Stahl- und Carbonbewehrung wird dadurch die Stahlbewehrung von der Risskontrolle weitgehend entlastet, was besonders vorteilhaft für die Dauerhaftigkeit ist. Während die Stahlbewehrung die erforderliche Tragfähigkeit sicherstellt, kontrolliert der Carbonbeton das Rissverhalten [1]. Diese effektive Nutzung hybrider Bewehrungen eröffnet neue Möglichkeiten für zukünftige Tragwerksplanungen und Instandsetzungskonzepte im dauerhaften Bahnbau.

Hinsichtlich der Dauerhaftigkeit der Materialien zeigt die Carbonfaser sowie im Rahmen des C3-Projektes untersuchten Tränkungsmaterialien aus Polyacrylat- und Epoxidharzen gegenüber schädigenden Einflüssen wie Chloridbeanspruchung und Carbonatisierung eine hohe Widerstandsfähigkeit auf. Aktuelle Forschungsprojekte und Langzeituntersuchungen im Labormaßstab zu den auf dem Markt verfügbaren Materialkombinationen bestätigen die Dauerhaftigkeit von Carbonbeton [1]. Erste praktische Anwendungen, insbesondere mit Epoxidharz- und Polyacrylat-getränkter Carbonbewehrung, zeigen, dass sich diese Leistungsfähigkeit auch unter realen Anwendungsbedingungen im derzeitigen Betrachtungszeitraum bestätigt.

Als weiteren positiven Aspekt ist in Bezug auf die Dauerhaftigkeit von Betonbauwerken die Möglichkeit des Einsatzes von carbonbasiertem Monitoring zu nennen. Mittels faseroptischem Monitoring können bestehende Bauwerke effizient untersucht und frühzeitig mögliche Fehlstellen identifiziert werden [20]. Dies ermöglicht eine gezielte und wirtschaftliche Wartung, die die Nutzungsdauer der Infrastrukturen verlängert und die Sicherheit im Bahnbetrieb erhöht.

2.3.2 Erfordernis von Erneuerungen

Carbonbeton zeichnet sich durch seine Dauerhaftigkeit aus, was die Notwendigkeit von Erneuerungen deutlich reduziert. Aktuell wurde im Rahmen von Zulassungen Nutzungsdauern von 100 Jahren nachgewiesen und weitere Annahmen von einer Nutzungsdauer von 200 Jahren und mehr getroffen. Jedoch können noch keine genauen Zeitangaben zur Nutzungsdauer von über

200 Jahren getätigt werden, da diese von vielen individuellen Faktoren abhängt. Die Rissbildung, Belastungskombinationen und Umwelteinflüsse, wie in den vorherigen Kapiteln beschrieben, spielen hierbei eine entscheidende Rolle. Eine fortlaufende Überwachung und Analyse der eingesetzten Materialien kann beispielsweise durch faseroptischem Monitoringsystemen umgesetzt werden /20/.

2.3.3 Wartungszyklen

Dank moderner Monitoring-Systeme, wie dem Feuchtemonitoring oder faseroptischer Messung, die den Zustand kontinuierlich überwachen, kann der Wartungsbedarf präzise erfasst und nur bei Bedarf Maßnahmen ergriffen werden /20,21/. Dies minimiert unvorhergesehene Ausfälle und Instandsetzungen.

3 Chancen für Ökologie, Ökonomie und Soziales

3.1 Nachhaltigkeitsanalyse

3.1.1 CO₂ Vergleich

Die CO₂-Bilanz von Carbonbeton zeigt sich vorteilhafter als die von herkömmlichem Stahlbeton – vorausgesetzt, die Konstruktion wird optimal an die Leistungsfähigkeit des Werkstoffs angepasst [22]. Bleiben die Querschnitte und Betonsorten bei neuen Bahnbrücken jedoch identisch zu bisherigen Konstruktionen und wird lediglich die Stahlbewehrung durch Carbon ersetzt, ist der positive Effekt vergleichsweise gering. Der wesentliche Vorteil von Textilbeton zeigt sich infolge der deutlich verlängerten Nutzungsdauer der Bauwerke und die Reduzierung der Bauteilabmessungen infolge reduzierter Betondeckungen.

Ein weiterer entscheidender Fortschritt in Bezug auf die CO₂-Bilanz wird erzielt, wenn R-Beton (ökologisch optimierter Beton) eingesetzt wird. Die CO₂-Emissionen bei der Herstellung dieses speziellen Betons sind wesentlich geringer als bisher übliche Betone. Die geringere Alkalität von R-Betonen ist – anders als bei Stahlbeton – unproblematisch, da Carbonbewehrungen im Gegensatz zu Stahlbewehrungen keinen alkalischen (Korrosions-)Schutz benötigen. Mit Hilfe des Einsatzes von R-Betonen können die CO₂-Emissionen um mehr als 60 % im Vergleich zur Verwendung von Stahlbeton reduziert werden.

Ferner kann durch eine Reduktion der eingesetzten Betonmenge die CO₂-Bilanz von Carbonbeton gegenüber Stahlbeton nochmals deutlich verbessert werden. Da kein mehrschichtiger Betonmantel für den Korrosionsschutz erforderlich ist, lassen sich Verstärkungsschichten von ursprünglich 8-10 cm auf 1-3 cm verringern. Diese Materialeinsparung führt zu einer Reduktion der CO₂-Emissionen um bis zu 80 %.

3.1.2 Kreislaufwirtschaft

Schon heute ist es möglich, Carbonbeton in einem geschlossenen Kreislauf zu nutzen. Beton und Carbon lassen sich voneinander trennen: Der Beton kann im Betonrecycling wiederverwendet werden, während das Carbon im Carbonrecycling-Prozess aufgearbeitet wird. Erste Carbonbewehrungen aus recycelten Carbonfasern befinden sich bereits in der Entwicklungs- und Zulassungsphase [23]. Darüber hinaus gibt es bedeutende Entwicklungsprojekte, wie das Projekt „Wir recyceln Fasern“, die kontinuierlich daran arbeiten, die Prozesse und Materialeigenschaften innerhalb der Kreislaufwirtschaft weiter zu optimieren [24,25].

3.2 Kosten

Ein Vergleich der Kosten ergibt ein vergleichbares Bild zu dem zuvor dargestellten CO₂-Vergleich. Bleiben die Konstruktionen und Betonsorten unverändert und wird lediglich die Stahlbewehrung durch eine Carbonbewehrung ersetzt, sind die Kosten für eine Carbonbeton nicht wesentlich niedriger als für ein Stahlbetonbauwerk. Zwar hat die Carbonbeton eine längere Lebensdauer, jedoch ist die Carbonbewehrung derzeit noch teurer als die herkömmliche Stahlbewehrung. In diesem Fall werden kaum Beton und damit auch nur wenig Materialkosten sowie CO₂-Emissionen eingespart.

Dies ändert sich jedoch signifikant, wenn die Potenziale von Carbonbeton ausgeschöpft werden. In diesem Fall relativieren sich die aktuell noch höheren Kosten für die Carbonbewehrung. Dabei sind die Vorteile im Überblick:

- Geringere Baukosten bei Neubauten aufgrund der längeren Lebensdauer im Vergleich zu Stahlbetonbrücken.
- Reduzierte Instandhaltungskosten, da die Carbonbewehrung nicht korrodiert.
- Deutlich geringere CO₂-Emissionskosten, da über 60 % weniger CO₂ ausgestoßen wird.
- Geringere Kosten für Ersatzneubauten, da Brücken durch eine Schicht Carbonbeton verstärkt und damit länger genutzt werden können.

3.3 Soziales

Carbonbeton verkörpert Nachhaltigkeit wie kaum ein anderer Baustoff – ökologisch, ökonomisch und sozial.

Betrachtet man den sozialen Aspekt, wird zunächst der Erhalt von natürlichen Lebensräumen und Erholungsgebieten für Mensch und Tier deutlich, da weniger Sand und Kies benötigt und somit der Abbau solcher Ressourcen reduziert wird. Dies schützt gleichzeitig unsere Wälder, die als Hauptlieferant für Sauerstoff unverzichtbar sind, insbesondere angesichts der wachsenden Weltbevölkerung und fortschreitenden Industrialisierung.

Darüber hinaus trägt die Nutzung von Carbonbeton zur Verbesserung der Luftqualität bei, da die CO₂-Emissionen verringert werden, dies mindert wiederum die Häufigkeit von durch Luftverschmutzung verursachten Krankheiten. Die Handhabung der leichten Carbonbewehrungen verbessert zudem die Arbeitsbedingungen für das ausführende Personal, so dass eine längere Berufstätigkeit ermöglicht und das Risiko vorzeitiger Arbeitsunfähigkeit reduziert wird.

Bestehende Bauwerke können mit einer Verstärkung mit Carbonbeton länger erhalten bleiben. Dies ist nicht nur aus betriebswirtschaftlicher Sicht von Vorteil, sondern auch volkswirtschaftlich sinnvoll. Der Erhalt bestehender Strukturen minimiert den Verbrauch natürlicher Ressourcen und reduziert den Aufwand an Arbeitskräften, die ansonsten für Abriss, Recycling und Neubau erforderlich wären. Auch historische Bauwerke und Denkmäler können mit Hilfe von Carbonbeton geschützt und erhalten werden, wodurch (Bau-)Geschichte und Kultur für kommende Generationen bewahrt werden.

4 Risikobewertung

Die Anwendung von Carbon- und Textilbeton bringt trotz zahlreicher Vorteile auch gewisse Risiken mit sich, die bei der Planung und Umsetzung berücksichtigt werden müssen. Diese Risiken beziehen sich auf technologische, wirtschaftliche und betriebliche Aspekte und erfordern eine sorgfältige Abwägung. Die wichtigsten Risiken im Zusammenhang mit der Nutzung basierend auf den zuvor vorgestellten Einsatzgebieten und Chancen dieser innovativen Baustoffe sind:

- **Kosten:** Die erhöhten initialen Materialkosten für Carbon- und Textilbeton im Vergleich zu herkömmlichen Materialien stellen ein finanzielles Risiko dar, insbesondere bei Projekten mit begrenzten Budgets. Zwar versprechen die langfristigen Einsparungen durch geringere Wartungs- und Instandhaltungskosten eine Kostenreduktion, doch ist dies schwer vorhersehbar und hängt von der vereinbarten Nutzungsdauer und den spezifischen Bedingungen des Bauwerks ab. Es besteht das Risiko, dass die höheren Initialkosten die Budgets überschreiten, wenn die erwarteten Einsparungen nicht eintreten.
- **Zeit:** Die Verwendung von Carbon- und Textilbeton kann zu Verzögerungen führen, insbesondere durch die Notwendigkeit von Genehmigungen wie einer UiG (Unternehmensinternen Genehmigung) oder einer ZiE (Zustimmung im Einzelfall). Diese zusätzlichen Anforderungen können den Planungsprozess verlängern. Ebenso können die erforderlichen Schulungen für gewerbliches Personal, das Akquirieren von geeigneten Planern und die Anpassung der Bauprozesse zu unerwarteten zeitlichen Verzögerungen führen. Sofern eine UiG oder ZiE vorliegt, kann davon ausgegangen werden, dass der Bauablauf nicht negativ beeinträchtigt wird.
- **Qualität:** Obwohl Carbon- und Textilbeton eine höhere Dauerhaftigkeit versprechen, besteht das Risiko, dass die erwartete Qualität bei unsachgemäßer Verarbeitung nicht erreicht wird. Insbesondere die Rissbildung und das Verhalten des Materials unter extremen klimatischen Bedingungen oder Belastungen müssen genau überwacht werden, um die Qualität der Konstruktion langfristig zu gewährleisten.
- **Planung:** Bei der Planung von Projekten, insbesondere bei Verstärkungsmaßnahmen, ist eine exakte statische Berechnung unerlässlich. Da es sich bei Carbon- und Textilbeton um neue Werkstoffe handelt, können der Randbedingungen ein iterativer Planungsprozess notwendig sein.
- **Genehmigungsverfahren:** Die Bauweise mit Carbon- und Textilbeton erfordert in vielen Fällen eine Unternehmensinterne Genehmigung (UiG) oder Zustimmung im Einzelfall (ZiE), welche den Planungsprozess verzögern können. Im Bereich der Anwendungen der Bahninfrastruktur ist es beispielsweise notwendig Signifikanzprüfungen durchzuführen, welche sich im Detaillierungsgrad bei tragfähiger Nutzung (statisch wirksam) und Abdichtungen (konstruktive Nutzung) unterscheiden.

Diese Risiken machen es erforderlich, frühzeitig in der Planungsphase Maßnahmen zur Risikominimierung zu entwickeln. Dazu gehören eine umfassende technische Analyse, die Sicherstellung von Genehmigungen, die genaue Planung der Kosten und des Zeitaufwands sowie die frühzeitige Einbindung entsprechender Fachplaner.

5 Anwendungsbeispiele

Carbonbeton bietet vielfältige Einsatzmöglichkeiten, die sowohl im Neubau als auch bei der Sanierung und Verstärkung bestehender Bauwerke innovative und nachhaltige Lösungen ermöglichen. Im Folgenden werden zwei Anwendungsbeispiele im Bahnsektor näher vorgestellt.

5.1 Verstärkung einer spannungsrissskorrosionsgefährdeten Brücke /26-29/

Als Beispiel dafür wird der Planungsprozess und die Technologie im Folgenden anhand des Bauwerks „UF Nidda“ am Autobahnkreuz Frankfurt West vorgestellt. Das Bauwerk besteht aus 3 Teilbauwerken die in Längsrichtung vorgespannt sind. Die Teilbauwerke 1 und 2 wurden 1971 errichtet, das Teilbauwerk 3 wurde bereits 1960 ausgeführt. Für die Vorspannung wurden zeitgemäße Spannsysteme gewählt, welche jedoch als spannungsrissskorrosionsgefährdet einzustufen sind. Für den sicheren Betrieb konnte kein ausreichendes Ankündigungsverhalten im Versagensfall nachgewiesen werden.



Abbildung 3: Ansicht Teilbauwerk Nidda

Planerisches Prinzip

Spannungsrissskorrosionsgefährdete Bauwerke können plötzlich ohne Vorankündigung versagen. Durch die Verstärkung der Tragkonstruktion ein duktileres Verformungsverhalten des Tragwerkes erreicht werden und somit das Ankündigungsverhalten im Versagensfall sichergestellt sein.

Auf der Grundlage der Nachrechnungsergebnisse wurde die statischen Defizite der Bauwerke lokalisiert und die Verstärkungsmaßnahmen geplant. Hierbei war es notwendig, die Durchfahrts Höhen in den Randfeldern und die Gradienten der Fahrbahn im Wesentlichen nicht zu verändern. Durch die Anwendung von carbonbewehrtem Beton konnte das Gewicht und die Dicke der zusätzlichen Verstärkungsschichten auf ein absolutes Minimum reduziert werden. Das eingesetzte Verstärkungssystem, bestehend aus einem speziell für den Einsatz bei Carbonbeton entwickelten Feinbeton und einem Carbongelege STgrid040, war nicht durch die für Verstärkungen im Innenbereich geltende Zulassung Z-31.10.182 abgedeckt. Die Erlangung einer Zustimmung im Einzelfall (ZiE) war erforderlich. Das hierfür nötige Versuchsprogramm setzte sich aus materialtechnischen Untersuchungen, Kleinbauteil- und Großbauteilversuchen (statisch und dynamisch) zusammen. Die Erlangung einer Zustimmung im Einzelfall (ZiE) war daher erforderlich, das hierfür

erforderliche Versuchsprogramm setzte sich aus materialtechnischen Untersuchungen, Kleinbauteil- und Großbauteilversuchen (statisch und dynamisch) zusammen. Aufbauend auf den Versuchen zur ZiE und den Ergebnissen der Bauwerksuntersuchung wurden die Bereiche mit statischen Defiziten so verstärkt, dass ein ausreichendes Ankündigungsverhalten der Bauwerke sichergestellt werden kann.

Abbildung 4 zeigt die ausgeführten Verstärkungen auf der Brückenoberseite (4 cm) und an der Brückenunterseite (3,5 cm). Die sehr geringen Auftragsstärken der Verstärkung führten dazu, dass keine Anpassung an der Straßengradiente bzw. Maßnahmen an den unterführten Radwegen erforderlich waren.

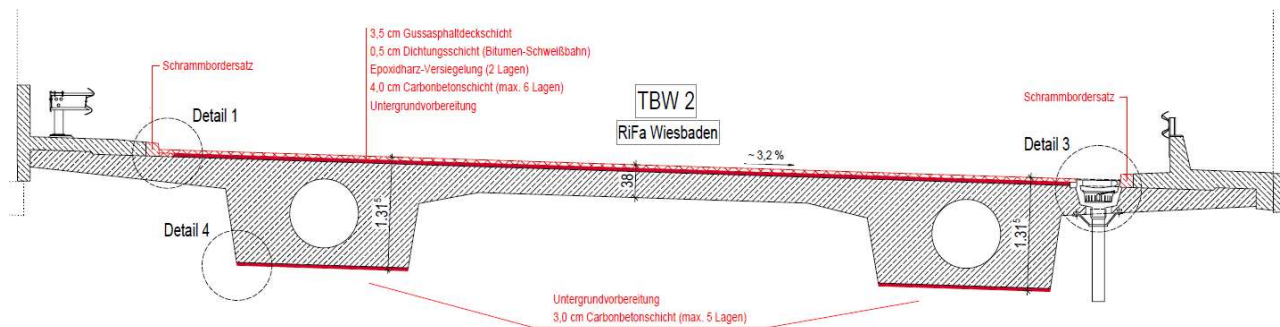


Abbildung 4: Verstärkung Teilbauwerk Nidda

Bauliche Ausführung

Für die erfolgreiche Durchführung einer Verstärkungsmaßnahme ist die Vorbereitung der zu Verstärkung vorgesehen Flächen von immenser Bedeutung. Neben ein genau definierten Rautiefe der Oberflächen müssen sowohl eine ausreichende Haftzugfestigkeit des Betons ($1,5\text{N/mm}^2$) und die Bauteil- und Außentemperaturen $5^\circ\text{-}30^\circ\text{C}$ in den erforderlichen Grenzen liegen. Die Haftzugfestigkeiten können eine zusätzliche Betoninstandsetzung erfordern, der erforderliche Temperaturkorridor kann nur in beschränktem Maße durch Einhausungen etc. sichergestellt werden.



Abbildung 5: Ansicht Teilbauwerk Nidda und Verstärkungsmaßnahme

Wichtig bei der Verarbeitung des Verstärkungssystems ist die „frisch in frisch“ Verarbeitung der einzelnen Lagen und korrekte Lage der Carbongelege. Nur so kann eine größtmögliche Wirkung der Verstärkung erzielt werden. Die Nachbehandlung der Oberflächen erfolgt durch Abdecken der Oberflächen mittels Filzmatten oder Folie.



a)



b)



c)

Abbildung 6: Verstärkungsmaßnahme: a) Baulicher Schutz; b) Verarbeitung „frisch in frisch“; c) fertige Verstärkungsschicht

5.2 Verstärkung einer Straßenbrücke mit Anhebung des Traglastniveaus /30/

Im Zuge eines Pilotprojektes wurde durch eine Verstärkung des Brückenüberbaues eine Erhöhung der Traglast erreicht. Das Bauwerk ist repräsentativ für noch häufig im Bestand vertretene kleine Bauwerke von Kommunen und Staatsstraßen. Die Stützweite des im Grundriss schiefwinkligen Tragwerks beträgt $\approx 9,30$ m. Der Überbau ist schlaff bewehrt und wurde 1951 errichtet. Das Bauwerk war vor der Verstärkungsmaßnahme in die Brückenklasse (BK) 30/30 eingestuft. Im Konkreten handelt es sich um eine einfeldrige Stahlbetonbrücke, die eine Staatsstraße über einen Bach überführt.



Abbildung 7: Ansicht der Plattenbrücke während der Verstärkungsarbeiten mit Carbonbeton

Das Bauwerk liegt in unmittelbarer Nähe zur BAB A4 und dient als Ausweichroute der Autobahn. Aufgrund örtlich ansässiger Firmen sowie der Nutzung als Ausweichroute ist die Belastung durch Schwerverkehr für die Straßenkategorie ungewöhnlich hoch. Daher wurde eine Verstärkung des Tragwerks aus der Brückenklasse BK 30/30 in die BK 60/30 angestrebt. Weiter sollte das Lichtraumprofil nicht eingeschränkt werden, um einen Einstau des unterseitigen Baches im Falle eines Hochwasserereignisses auszuschließen.

Die Verstärkungsmaßnahme Kleinsaubernitz wurde im August 2020 umgesetzt. Das Plattentragwerk wurde mit dem Carbongelege SITGrid 040 verstärkt, welches auch als Referenzmaterial innerhalb des Forschungsvorhabens C³ - Carbon Concrete Composite fungierte. Im Konkreten wurde eine dreilagige Verstärkung in Längsrichtung sowie eine Lage in Querrichtung notwendig. Einen Überblick über die Verteilung der Verstärkungsmaßnahme, bietet Abbildung 8.

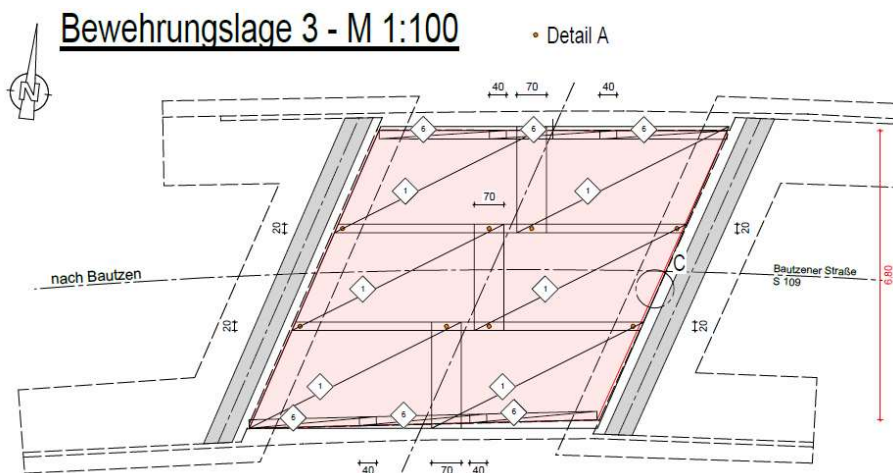


Abbildung 8: Exemplarische Bewehrungslage mit Carbon (hier 3.Lage) am Bauwerk Kleinsaubernitz

In Abbildung 9 ist die Verstärkungsmaßnahme schematisch dargestellt.

Regeldetail - M 1:1 [mm]

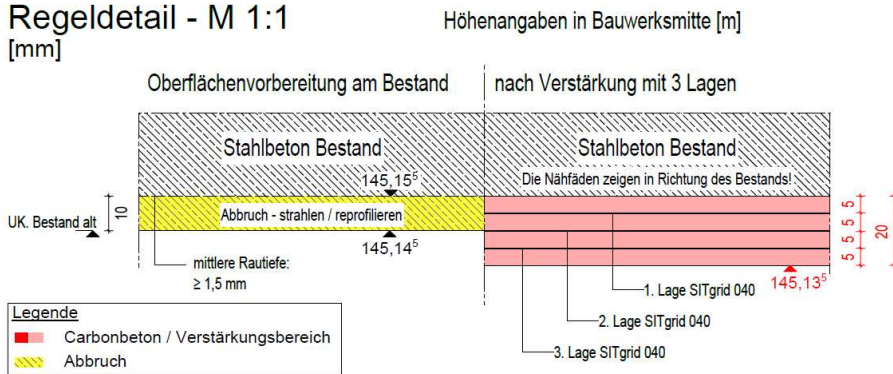


Abbildung 9: Aufbau der Verstärkungsschicht am Bauwerk Kleinsaubernitz

Die Verstärkungsarbeiten, inklusive Oberflächenvorbereitung und Applikation der Verstärkung, nahmen zwei Wochen in Anspruch. Das Bauwerk wurde bereits 10 Tage später wieder für den Verkehr freigegeben.

Die dargestellten Varianten stellen Möglichkeiten dar, die Tragfähigkeit bestehender Brücken zu erhöhen, im bahnspezifischen Fall könnten so Strecken für Umleiterverkehre kurzfristig ertüchtigt und der Lastklassenbeiwert α für Brückenbauwerke erhöht werden.

5.3 Kevag Viadukt

Im Rahmen eines Pilotprojektes wurde bei einem ca. 100 Jahre alten Viadukt, welches signifikante Durchfeuchtungsschäden infolge von rückstauernder Nässe im Bereich des Gewölberückens aufwies, aus Textilbeton eine Rückenabdichtung zur Abdichtung des Bauwerks realisiert. Die Rückenabdichtung besteht aus einer Textilbetonschicht mit einer nichtmetallischen Carbonbewehrung getränkt mit Acrylat und einem Dichtmörtelsystem, welches auf den Gewölberücken appliziert wird. Die Materialkombination aus Mörtel und Bewehrung ermöglicht Rissbreiten kleiner 0,1 mm und kann damit aus technischer Sicht als „dicht“ beurteilt werden.

Die Applikation der Rückenabdichtung wurde in den folgenden Schritten ausgeführt:

- Freilegen des Gewölberückens, d.h. Ausbau von Schienen und Schwellen sowie Gleisschotter,
- Reinigung des Mauerwerkuntergrundes von Verunreinigungen,
- Applikation einer Polymerzementschlämme als Randabdichtung sowie Haftvermittler auf noch vorhandene Abdichtungsreste,
- Einbau von ca. 30 mm Textilbeton, bestehend aus zwei Lagen Mörtel à 15 mm sowie einer Bewehrungslage,
- Einbau einer Geotextillage als Schutz der Abdichtung vor dem Einbau des Gleisschotter,
- Einbau von Gleisschotter, Schiene und Schwelle.

Zusätzlich zu der textilbewehrten Abdichtung wurde ein Monitoringsystem vor Applikation der Abdichtung in das Bauwerk eingebaut, um das Austrocknungsverhalten infolge der Applikation der Abdichtung zu überwachen und verifizieren zu können.

Die Ausführung der Pilotanwendung hat gezeigt, dass die textilbewehrte Mörtelschicht als Rückenabdichtung nach den technischen Anforderungen als Pilotanwendung in vorgegeben Zeitintervallen umgesetzt werden konnte. Ferner bietet die Applikation von zementbasierten Produkten die Möglichkeit erforderliche Wartezeiten infolge von nassen Untergründen auf ein Minimum zu reduzieren und so flexibel auf Anforderungen aus Witterung oder dem Bauablauf zu reagieren. Die nachfolgenden Bilder zeigen den Bauablauf der Instandsetzung bei dem Pilotprojekt.



Abbildung 10: Kevag Viadukt – Rückbau Gleise und Ausbau Bestandsschotter



Abbildung 11: Kevag Viadukt – Reinigung des Untergrundes mittels Hochdruckwasserstrahlen



Abbildung 12: Kevag Viadukt – Applikation Textilbeton – hier: erste Lage Textilbeton und mittig eingelegte Bewehrung

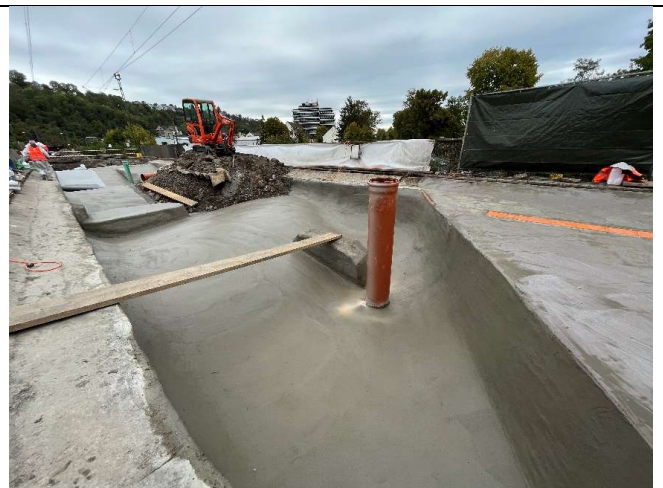


Abbildung 13: Kevag Viadukt – Fertig hergestellte Rückenabdichtung aus Textilbeton

5.4 Eisenbahnüberführung Großschwabhausen

Als Instandsetzungsmaßnahme bei gemauerten Gewölbebrücken kann sowohl eine Abdichtung an der Oberseite – wie zuvor dargestellt – als auch an der Unterseite des Bauwerks erfolgen. Für den zweiten Anwendungsfall wurde als neuartiges Abdichtungssystem von der Unterseite ein nachhaltiges, mörtelbasiertes, textilbewehrtes Abdichtungssystem für die Unterseite von Gewölben entwickelt und in einem Demonstrator validiert /11/.

In Zusammenarbeit mit der DB Netz AG wurde eine Eisenbahnüberführung in der Nähe von Großschwabhausen, bestehend aus sieben Segmenten à 3,7 m, ausgewählt. Zwei Segmente wurden mit dem entwickelten Abdichtungssystem instandgesetzt, während die restlichen fünf Segmente parallel von der DB Infra Go mit Sanierputz instandgesetzt wurden, um einen direkten Vergleich der Systeme zu ermöglichen. Die Brücke besteht aus einem gestelzten Kreisbogen aus Ziegelmauerwerk auf einem 0,9 m hohen Natursteinsockel. Die lichte Durchgangsbreite betrug etwa 2,5 m /11/. Das Gewölbe zeigte vor der Instandsetzung großflächige Durchfeuchtungen und Abschaltungen der Ziegel, verursacht durch Frostschäden. Hohlliegende und teilweise abgelöste Putzschichten wurden entfernt, und stark geschädigte Steine wurden partiell ersetzt /11/.

Vor der Instandsetzung mittels Textilbeton sowie Sanierputz wurde zusätzlich der Stirnring im ersten Segment wieder fest am Gewölbe verankert. Neben der optischen Inspektion erfolgte eine Ankerauszugsprüfung mit einer speziell angepassten Vorrichtung. Die mittlere Auszugskraft betrug 1,56 kN. Basierend auf dieser Kraft und der Rohdichte des eingesetzten Mörtels konnten die Anker die Last von ca. 3 m² des Abdichtungssystems tragen. Aus statischen Gründen wurden vier Anker pro m² eingesetzt /11/.

Die nachfolgenden Bilder zeigen den Ablauf der Instandsetzungsarbeiten mit Textilbeton bei dem o.g. Demonstrator. Vor dem Auftrag des Abdichtungssystems wurden lose und hohlliegende Teile entfernt, und eine partielle Reprofilierung schaffte eine ebene Oberfläche. Anschließend erfolgte die Reinigung und Vornässung des Untergrunds mittels Hochdruckreiniger.



Abbildung 14: Exemplarische Darstellung einzelner Applikationsschritte: a) Setzen der Dübelhülsen, b) Reinigung und Vornässen des Untergrunds mittels Hochdruckreiniger, c) Vorlegen der ersten Mörtellage bis auf Höhe der Abstandshalter, d) Verputzen der textilen Bewehrung mit der Zahnkeller, e) Erste Mörtellage, f) Auftrag der zweiten Mörtellage nach 14-tägiger Aushärtungszeit /11/

In regelmäßigen Abständen fanden nach der Applikation der Abdichtungssysteme von der Unterseite Kontrolltermine statt, um die Wirksamkeit der Abdichtung zu prüfen und Unterschiede zu den mit Sanierputz behandelten Segmenten festzustellen. Während der Sanierputz deutliche Durchfeuchtungen und Ausblühungen zeigte, blieb die Textilbetonschale an der Oberfläche trocken /11/, was die Leistungsfähigkeit von Textilbetonen eindeutig zeigt.

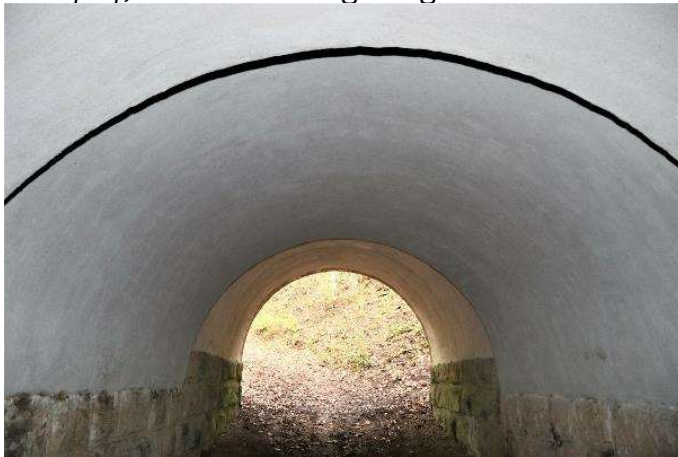


Abbildung 15: Optische Begutachtung des Demonstratorgewölbes fünf Monate nach der Applikation der Textilbetonschale /11/

5.5 Neubau /31/

Als Beispiel für eine Neubauanwendung von Carbonbeton wird nachfolgend eines Pilotprojekts, der sächsischen Straßenbau- und Verkehrsverwaltung, zum Neubau einer Straßenbrücke aus Carbonbeton aus dem Jahr 2021 vorgestellt.

Der Neubau der von Sachsens erster Straßenbrücke aus Carbonbeton Straßenbrücke erfolgte in der ostsächsischen Ortslage Wurschen im Landkreis Bautzen. Das Bauwerk überführt die Staatsstraße 111 über das Kuppritzer Wasser und ersetzt die bestehende marode Stahlbetonbrücke aus den 30-er Jahren des letzten Jahrhunderts. Die Stützweite des neuen Bauwerks beträgt 6,60 m. Die Bauwerksbreite liegt bei 11,60 m. Auf der Brücke werden beidseitig Kappen sowie beidseitige Holmgeländer und Schutzeinrichtungen angeordnet. Während die Herstellung der Unterbauten in üblicher Stahlbetonbauweise erfolgt, werden der Brückenüberbau sowie die Randkappen mithilfe der neu entwickelten Carbonbetonbauweise realisiert. Die Querschnittform der linsenförmigen Plattenbrücke wurde hierbei explizit auf die Carbonbetonbauweise angepasst.

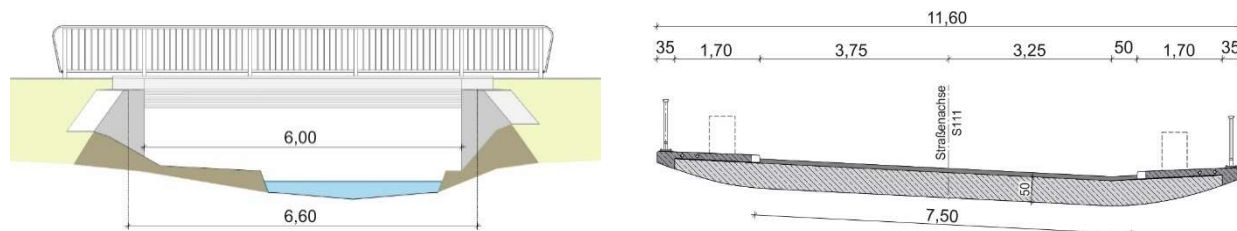


Abbildung 16: Längsansicht und Querschnitt des Bauwerks

Die Bemessung des Bauwerkes erfolgte unter Beachtung des Lastmodells 1 sowie des Ermüdungslastmodells 3 gemäß DIN EN 1991-2, welche die normativen Regellasten für Straßenbrücken abbilden. Im Rahmen der Planung des Brückenüberbaus wurden sowohl Carbonflächenbewehrungen als auch Carbonstabbewehrungen berücksichtigt. Für den Carbonbetonüberbau kommt ein Beton der Festigkeitsklasse C 50/60 zum Einsatz. Die Herstellung der Carbonkappen erfolgt mithilfe eines Luftporenbetons der Festigkeitsklasse C 30/37.



Abbildung 17: Carbonbewehrungen

Die geplante Kombination der Materialien ermöglicht die Herstellung eines hochtragfähigen und sehr dauerhaften Bauwerks. Im Hinblick auf die positiven Eigenschaften der Carbonbewehrung sind hierbei insbesondere die Korrosionsbeständigkeit sowie die im Vergleich zu Betonstahl deutlich gesteigerte Ermüdungsfestigkeit hervorzuheben. Mithilfe der Carbonbetonbauweise können der Erhaltungsaufwand sowie die Wartungszyklen des Bauwerks verringert und die Nutzungsdauer gegenüber dem heutigen Brückenbestand aus Stahlbeton deutlich gesteigert werden. Schäden durch chloridinduzierte Korrosion oder Ermüdungsprobleme der Bewehrungen werden somit für zukünftige Carbonbetonbauwerke ausgeschlossen.

Infolge zum Planungszeitpunkt noch fehlenden normativen Bemessungsrundlagen waren im Vorfeld des Projektes umfassende Voruntersuchungen erforderlich. In Zusammenarbeit mit den Projektpartnern der CARBOCON GmbH aus Dresden sowie des Instituts für Massivbau der Technischen Universität Dresden wurden umfassende Material- und Bauteiluntersuchungen durchgeführt. Diese bestätigten die große Leistungsfähigkeit von Carbonbeton. Die Material- und Kennwertuntersuchungen wurden mit der Erteilung einer Zustimmung im Einzelfall für die Herstellung des Erstneubaus aus Carbonbeton des Sächsischen Staatsministeriums für Wirtschaft, Arbeit und Verkehr im November 2020 abgeschlossen.

Die Bemessung und Planung des Bauwerks erfolgte unter Beachtung der spezifischen Materialeigenschaften und Konstruktionsgrundlagen von Carbonbeton. Besonders im Zuge der konstruktiven Durchbildung der Bauteile wurden verschiedene Konstruktionsdetails und Bemessungsansätze entwickelt und abgestimmt.



Überbau - untere Bewehrungslage



Randkappe

Abbildung 18: Carbonbetonbewehrung

Im Anschluss an die erfolgreiche Fertigstellung des Bauwerkes wurde die Tragfähigkeit der Straßenbrücke aus Carbonbeton mithilfe von Belastungsversuchen eindrucksvoll bestätigt. Die planmäßige Verkehrsfreigabe Übergabe des Bauwerkes erfolgte im Dezember 2021.



Abbildung 19: Betonage und Ansicht des fertiggestellten Bauwerkes

6 Literaturverzeichnis

- /1/ Curbach, Manfred, Josef Hegger, Frank Schladitz, Matthias Tietze, Matthias Lieboldt, Handbuch Carbonbeton - Einsatz nichtmetallischer Bewehrung. (2023), Ernst & Sohn, Berlin
- /2/ Ehlig, D, F Jesse, M Curbach, High temperature tests on textile reinforced concrete (TRC) strain specimens. (2010), 2nd International RILEM Conference on Material Science Textile Reinforced Concrete, RILEM Publication SARL
- /3/ Morales Cruz, Cynthia, Crack-distributing carbon textile reinforced concrete protection layers. Ph.D. Thesis. (2020), RWTH Aachen University, Aachen, Germany
- /4/ Kulas, Christian, Zum Tragverhalten getränkter textiler Bewehrungselemente für Betonbauteile. (2013), RWTH Aachen University, Institut für Massivbau
- /5/ Dahlhoff, Annette, Cynthia Morales Cruz, Michael Raupach, Influence of Selected Impregnation Materials on the Tensile Strength for Carbon Textile Reinforced Concrete at Elevated Temperatures. (2022), Buildings, 12, 2177
- /6/ Asgharzadeh, Amir, Durability of polymer impregnated carbon textiles as CP anode for reinforced concrete. (2019), Dissertation, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen
- /7/ Driessen-Ohlenforst, Carla, SMART-DECK: Multifunctional carbon-reinforced concrete interlayer for bridges. (2020), Materials and Corrosion, 71, 786-796
- /8/ Driessen, Carla, Michael Raupach, SMART DECK - Ein multifunktionaler Brückenbelag aus Textilbeton. (2016), Bautechnik, 93, 102-104
- /9/ Deutscher Ausschuss für Stahlbeton e.V. DAfStb-Richtlinie - Betonbauteile mit nichtmetallischer Bewehrung. (2024)
- /10/ Wasserbau, Bundesanstalt für, BAW Merkblatt Flächige Instandsetzung von Wasserbauwerken mit textilbewehrten Mörtel- und Betonschichten (MITEX). (2019), Bundesanstalt für Wasserbau (BAW): Karlsruhe, Germany
- /11/ Kriescher, Kevin, Cynthia Morales Cruz, Entwicklung eines mörtelbasierten, textilbewehrten Abdichtungssystems für gemauerte Gewölbebrücken. (2023), 8. Kolloquium Erhaltung von Bauwerken: Beurteilung, Instandsetzung und Denkmalpflege von Bauwerken Tagungshandbuch 2023
- /12/ Rempel, Sergej, Erich Erhard, Heinz-Günter Schmidt, Norbert Will, Die Sanierung des Mariendomedaches in Neviges mit carbonbewehrtem Spritzmörtel. (2018), Beton- und Stahlbetonbau, 113, 543-550
- /13/ Orłowsky, Jeanette, Michael Raupach, Andreas Westendarp, Turgay Öztürk, Instandsetzung-Textilbewehrte Spritzmörtel zur Instandsetzung von Wasserbauwerken. (2011), Beton-Hamburg, 61, 486
- /14/ Büttner, Till, Cynthia Morales Cruz, Michael Raupach, Dauerhafte Schutzschichten aus Textilbeton für Bauwerksoberflächen im Wasserbau. (2013), Bautechnik 90, Heft 8,
- /15/ <https://bruecken.deutschebahn.com/fragen-und-antworten-1>
- /16/ TR IH: Technische Regel - Instandhaltung von Betonbauwerken (TR Instandhaltung) - Teil 1: Anwendungsbereich und Planung der Instandhaltung. (2020), Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt), Germany
- /17/ TR IH: Technische Regel - Instandhaltung von Betonbauwerken (TR Instandhaltung) - Teil 2: Merkmale von Produkten oder Systemen für die Instandsetzung und Regelungen für deren Verwendung. (2020), Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt), Germany
- /18/ Straßenwesen, Bundesanstalt für, Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten (ZTV-ING). (2003-01)
- /19/ Lorenz, Enrico, Regine Ortlepp, Untersuchungen zur Bestimmung der Übergreifungslängen textiler Bewehrungen aus Carbon in Textilbeton (TRC). (2011), ORTLEPP, R. (Hrsg.): Textilbeton in Theorie und Praxis: Tagungsband zum, 6, 85-102

- /20/ Zdanowicz, Katarzyna, Łukasz Bednarski, Tomasz Howiacki, Rafał Sieńko, Verteilte Dehnungsmessungen von Spannbetonbauteilen mit faseroptischen Sensoren. (2022), Beton-und Stahlbetonbau, 117, 539-547
- /21/ Achenbach, Rebecca, Michael Raupach, 30 Jahre Multiringelektrode. (2023), 8. Kolloquium Erhaltung von Bauwerken: Beurteilung, Instandsetzung und Denkmalpflege von Bauwerken Tagungshandbuch 2023
- /22/ Fact Sheet Ökobilanz von Carbonbeton, C³-Verband
- /23/ Fact Sheet Recycling von Carbonbeton, C³-Verband
- /24/ Wir recyceln Fasern, <https://wir-recyceln-fasern.de/>
- /25/ Umweltproduktdeklaration (EPD) (n.d) Bewehrungs- und Befestigungssysteme solidian GRID und solidian REBAR. 11.12.2022: ift Rosenheim GmbH
- /26/ Oliver Steinbock, Eberhard Pelke, Oliver Ost Carbonbeton – Eine neue Verstärkungsmethode für Massivbrücken; Teil 1: Grundlagen und Hintergründe zum Pilotprojekt „Brücken über die Nidda im Zuge der BAB A 648“ (2021) Sonderdruck Beton-und Stahlbetonbau, 116, Heft 2
- /27/ Oliver Steinbock, Thomas Bösche, Alexander Schumann Carbonbeton – Eine neue Verstärkungsmethode für Massivbrücken Teil 2: Carbonbeton im Brückenbau und Informationen zur Zustimmung im Einzelfall für das Pilotprojekt „Brücken über die Nidda im Zuge der BAB A 648“ (2021) Sonderdruck Beton-und Stahlbetonbau, 116, Heft 2
- /28/ Oliver Steinbock, Frederik Teworte, Bastian Neis Carbonbeton – Eine neue Verstärkungsmethode für Massivbrücken Teil 3: Planung und Umsetzung der Verstärkungsmaßnahme mit Carbonbeton am Pilotprojekt „Brücken über die Nidda im Zuge der BAB A 648“ (2021) Sonderdruck Beton-und Stahlbetonbau, 116, Heft 2
- /29/ Oliver Steinbock, Timm Wetzel Verstärkung einer Spannbetonbrücke mit Carbonbeton
Erweiterte Rechenmethoden zum Ankündigungsverhalten von Brücken mit spannungsrissskorrosionsgefährdetem Spannstahl 98 (2021) Heft 10 S. 711-719
- /30/ Steinbock, O. (2021) Verstärkung von Stahl und Spannbetonbrücken unter Verwendung von Carbonbeton (2021), Dissertation Institut für Massivbau, TU Dresden
- /31/ Enrico Lorenz, Alexander Peter, Sebastian May, Thomas Bösche
Planung und Neubau einer Straßenbrücke aus Carbonbeton (2023) Sonderdruck Beton-und Stahlbetonbau, 118, Heft 9