



Manteldokument ZIB: „Baustoffe der Zukunft“

Revolution durch Innovation

„Baustoffe der Zukunft“

Übersicht Manteldokument:

Dieser Arbeitskreis wurde durch die DB InfraGO AG geleitet durch:

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

Die Unterlage wurde geprüft von:

Prof. em. Dr. Eugen Brühwiler

EPFL – ETH Lausanne

Beratender Ingenieur

Schweiz

Der Arbeitskreis:

Die Gruppe setzt sich zusammen aus KIBAG, LEUBE, MKP, Kleihues, König Bau, CBING, C³, RWTH Aachen, TU Dresden, EPFL Lausanne, MKIngenieure, FOLAB und folgende Personen waren beteiligt:

ZMI:

Dr. Christian Stettner

RWTH Aachen:

Annette Dahlhoff

MKP:

Kristin Kottmeier

MK Ingenieure

Dr. Till Büttner

König Bau:

Michael Falk

KIBAG:

Stefan Vogt

FOLAB:

Dr. Katarzyna Zdanowicz

Leube:

Gerhard Thaler, Anton Steiner

CBING:

Dr. Steffen Schröder

Kleihues-Beton:

Martin Großkopf

C³:

Dr. Frank Schladitz

Inhaltsverzeichnis

1.	Einführung	4
2.	Zeitfresser und Probleme bei der Sanierung von Ingenieurbauwerken	5
2.1	Zeitfresser Planen	5
2.2	Zeitfresser Bauen	6
2.3	Zeitfresser Betreiben	7
3.	UHFB	10
3.1	Beschreibung UHFB	10
3.2	Einsatzzwecke, Vorteile und Risiken	10
3.3	Chancen für Ökologie, Ökonomie und Soziales	11
3.4	Anwendungsbeispiel	11
4.	Carbonbeton	12
4.1	Beschreibung Carbonbeton	12
4.2	Einsatzzwecke, Vorteile und Risiken	12
4.3	Chancen für Ökologie, Ökonomie und Soziales	13
4.4	Anwendungsbeispiel	13
5.	Öko-Beton	14
5.1	Beschreibung Öko-Beton	14
5.2	Einsatzzwecke, Vorteile und Risiken	14
5.3	Chancen für Ökologie, Ökonomie und Soziales	15
5.4	Anwendungsbeispiel	15
6.	Innovatives Monitoring am Beispiel von Faseroptik	16
6.1	Beschreibung des innovativen Monitorings	16
6.2	Einsatzzwecke, Vorteile und Risiken	16
6.3	Chancen für Ökologie, Ökonomie und Soziales	17
6.4	Anwendungsbeispiel	18
7.	Fazit und Gesamtbeurteilung	19

1. Einführung

Die Zukunftsinitiative Bahnbau (ZIB) zeigt Wege auf, wie die Leistungsfähigkeit der vorhandenen Bahninfrastruktur gesichert und unter Berücksichtigung der Klimaschutzziele weiter ausgebaut werden kann. Die Lösungen wurden innerhalb dieser fünf Themencluster erarbeitet:

- Attraktivität Bahnbauberufe
- Rahmenbedingungen
- Produktivität & Innovation
- Grünes Planen, Bauen und Betreiben
- Partnerschaftliche Zusammenarbeit

Im Cluster „Produktivität & Innovation“ werden die im ZIB definierten Ziele weiterverfolgt und für den Lösungsweg im Rahmen der „Baustoffen der Zukunft“ konkretisiert:

Im vorliegenden Dokument werden neuartige Baustoffe, Bauverfahren und Messmethoden und die Erfahrungen in der Anwendung dieser Innovationen vorgestellt. Experten und Expertinnen aus dem Bereich Planen, Bauen und Betrieb stellen diese Informationen als Bausteine zur Verfügung, um obige Ziele erreichen zu können. Für vertiefte Informationen zu diesen neuen Technologien wurden weitere Ausarbeitungen diesem Manteldokument angehängt.

Das hier zur Verfügung gestellte Manteldokument für die „Baustoffe der Zukunft“ beschreibt in einer kurzen Übersicht die Schwerpunktbereiche aus Ultra-Hochfesten-Faserbaustoff (UHFB), Textil- und Carbonbeton, Öko-Beton und dem Monitoring mit dem Schwerpunkt der Faseroptischen Messung, siehe Abbildung 1. Die jeweiligen Vertiefungsdokumente können auf der jeweiligen Seite digital mit einem QR-Code eingesehen werden.

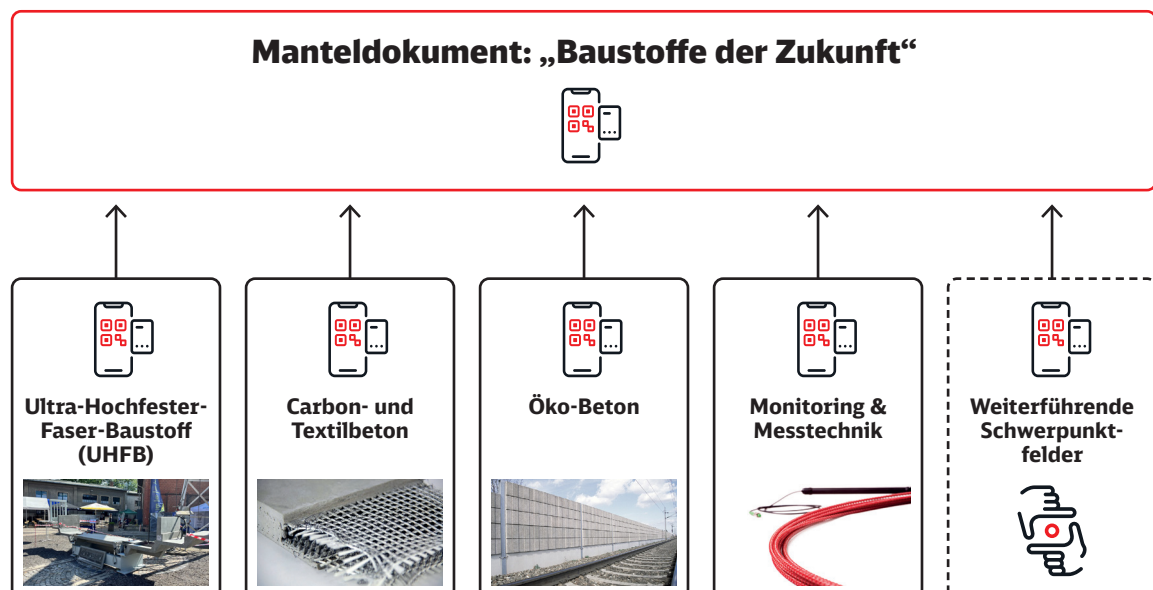


Abbildung 1: Aufbau des Manteldokuments und den 4 Vertiefungsdokumenten – Quelle: InfraGO AG, Pelka

2. Zeitfresser und Probleme beim Bauen im Bestand von Ingenieurbauwerken der Bahn

Die Anforderung schneller, kostengünstiger und klimafreundlicher zu bauen, bedarf der Entwicklung neuer Baustoffe, Bauverfahren und Planungsmethoden. An Universitäten und Hochschulen wird in Zusammenarbeit mit Industriepartnern daran intensiv geforscht. Neuartige, hochleistungsfähige Baustoffe, wie z.B. UHFB und Carbonbeton, haben bereits den Weg in die Praxis gefunden. Durch Anpassungen in der Herstellung und der Zusammensetzung von Zementen kann CO₂ eingespart werden und klimafreundlich mit Beton gebaut werden. Wie und wo können diese Innovationen auch im Bahnbau sinnvoll eingesetzt werden? Wo existieren derzeit Probleme und Zeitfresser, die innovative Lösungen erfordern? Planungs- und Bauprozesse spielen für die Beantwortung dieser Fragen eine wesentliche Rolle.

2.1 Zeitfresser Planen

Um den Bestand der Infrastruktur verlässlich und leistungsfähig zu machen, bedarf es Instandsetzungen und Ertüchtigungen der Bauwerke sowie Neubauten im Netz der Deutschen Bahn. Diese notwendigen Maßnahmen lassen sich in einen Planungs- und Bauprozess gliedern. Die Entscheidung für den Erhalt oder den Neubau eines Bauwerkes hängt von mehreren Faktoren (Bauwerkszustand, Anforderungen aus dem Betrieb, Einsatz neuer Technologien, etc.) ab, die im Planungsprozess zu bewerten sind. Dort wird auch entschieden, welche Materialien und Verfahren später im Bauprozess zur Anwendung kommen.

Im Standard-Planungsprozess wird die Aufgabenstellung bei der Grundlagenermittlung (LPH1) analysiert. Für diese Aufgabenstellung werden im Rahmen der Vorplanung (LPH2) Lösungsvarianten erarbeitet. Die vom Auftraggeber gewünschte Vorzugsvariante arbeitet der Planende in der Entwurfsplanung aus und überführt diese – sofern erforderlich – in eine Genehmigungsplanung.

Grundsätzlich besteht in einem Standard-Planungsablauf immer auch Potential für Optimierungen. An dieser Stelle steht aber im Fokus, welche Randbedingungen erforderlich sind, dass innovative, neue Methoden in den Planungsprozess einfließen.

Der „Standardweg“ wird verlassen, wenn

- **Standardverfahren nicht in der Lage** sind, die Aufgabenstellung zu lösen
- den Planenden und Auftraggebern die Technologie und der Anwendungsbereich **innovativer Baustoffe und Methoden** nicht bekannt ist
- **Innovative Verfahren** die **Lösung besser** machen (Kosten, Termine, Nutzung)
- **Genehmigungsprozesse** für die Anwendung innovativer Baustoffe und Methoden planbar und in den Planungsprozess integrierbar sind
- Das Risiko durch das **Verlassen des Standardwegs** getragen werden kann.

2.2 Zeitfresser Bauen

Maßnahmen im Bestand sind mit Eingriffen in das Bahnnetz und damit Einschränkungen für den Betrieb verbunden. Wesentliche Zielstellung in der Planung und Ausführung dieser Maßnahmen ist neben der Kostenminimierung, **Sperrzeiten zu vermeiden oder möglichst gering** zu halten.

In der Herstellung von neuen Bauwerken wird so weit als möglich auf **Vorfertigung** gesetzt. Dadurch kann mittels Einhub- oder Einschubvorgänge die Unterbrechung des Betriebs minimiert werden. Sind Maßnahmen, z.B. Ertüchtigungs- oder Instandsetzungsmaßnahmen an bestehenden Bauwerken erforderlich, erfolgen diese Großteils im Bereich des Gleises. Zeitfresser, denen hier nicht durch Erhöhung der Kapazität entgegengewirkt werden kann, sind z.B. **Aushärtezeiten von Materialien** (z.B. Aushärtezeit des Konstruktionsbetons vor Aufbringen der Abdichtung (i.d.R 28 Tage) oder zeitliche Einschränkungen aufgrund vorherrschender Witterung und Bauteiltemperaturen.

- Aus dieser Analyse heraus werden folgende Einsatzmöglichkeiten für innovative Baustoffe gesehen:
- Verwenden von hochfesten Baustoffen, Querschnitte werden schlanker, Einhub- und Einschubvorgänge optimiert.
- Verwenden von hochfesten Baustoffen im Bereich der Ertüchtigung und Verstärkung, weniger Zusatzgewichte für den Bestand, größere Chancen für den Erhalt bestehender Bauwerke im Sinne der Nachhaltigkeit (z.B. Gewölbebrücken).
- Ersatz von kunststoffbasierten Materialien bei der Erneuerung von Abdichtungen durch zementbasierte Abdichtungen (UHFB), schnellere Aushärtezeiten, weniger Arbeitsgänge, weniger witterungsempfindlich (durch UHFB ist keine konventionelle Abdichtung mehr erforderlich).
- Verwendung von Carbonbeton, Erhöhung der Dauerhaftigkeit, weniger Instandsetzungsaufwand und Eingriffe in den Betrieb im Zuge der späteren Nutzung

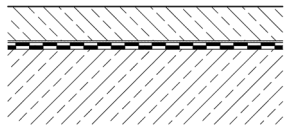
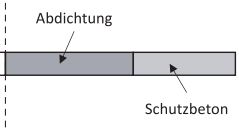
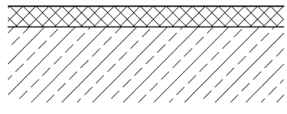
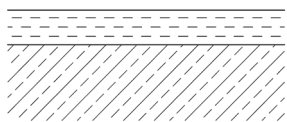
Typ	Aufbau	Vorbereitung Betonuntergrund	Abdichtungsarbeiten
Bitumen-Abdichtung			
UHFB			
Textilbeton			

Abbildung 2: Zeitfresser am Beispiel von Abdichtungsarbeiten (Der zeitliche Aufwand und das Verhältnis des Schichtaufbaus wird anhand der Balkenlänge ausgedrückt) – Quelle: DB InfraGO, Mölter u. ZMI, Dr.Stettner

2.3 Zeitfresser Betreiben

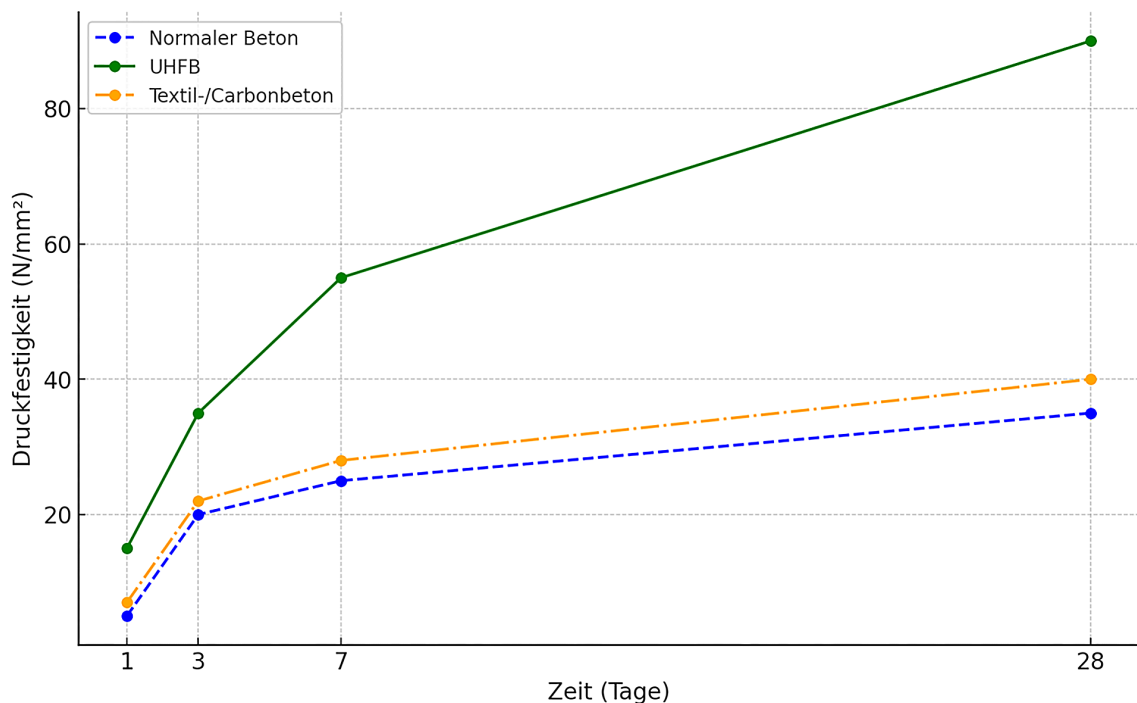
Neben der Planungs- und Bauprozessen gibt es auch im Bereich des Betriebes erhebliche Vorteile. Durch die Kombination der nichtmetallischen Bewehrung bleiben mögliche Folgeschäden der Korrosion fern. Die zusätzlich hohe Packungsdicht beim Einsatz der innovativen Werkstoffe schirmt das Haupttragwerk von weiterführenden Feuchteschäden ab.

Die Bauweise zeichnet sich durch eine fugenlose Gestaltung aus, die das Risiko der Rissbildung vermindert und einen effektiven Schutz vor Wasser- und Chlorideintrag bietet. Im Bereich hochbeanspruchter Bereiche, bei denen definierte Risse entstehen könnten, kann im Vorfeld auch Enthaftungsmaterialien eingesetzt werden, um eine Rissverteilung herbeizuführen. Dadurch wird auch ein tiefgreifender Instandhaltungsaufwand mit eventueller komplexer kraftschlüssiger Vernadelungsarbeiten umgangen.

Durch diese Schutzfunktionen bieten die Werkstoffe eine hohe Langlebigkeit, was die Notwendigkeit von häufigen Instandsetzung und Streckensperrungen.

Müssen nach dem Instandhaltungsregime der DB bestimmte Tätigkeiten am Tragwerk durchgeführt werden, so kann mit den schnell erhärtenden Baustoffen auch in Zugpausen eine Reparatur durchgeführt werden. Im Vergleich zu den Aushärtegeschwindigkeiten kann u.a. mit UHFB schon nach wenigen Stunden eine notwendige Festigkeit erreicht werden, das die Oberfläche betreten, beschottert und nach einem Tag befahren werden kann, so wie das Diagramm zeigt:

Diagramm1: Gegenüberstellung der Aushärtung zu Druckfestigkeit – Quelle: DB InfraGO AG



Vorstellung der Baustoffe der Zukunft

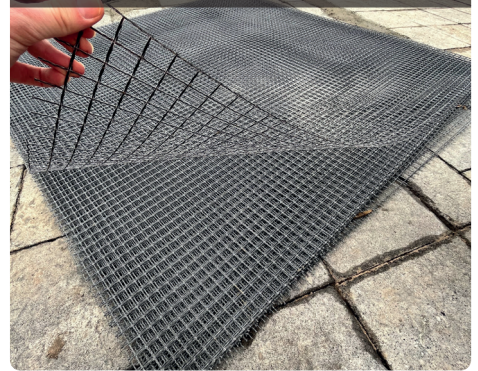
Ultra-Hochfester-Faser-Baustoff



Öko-Beton

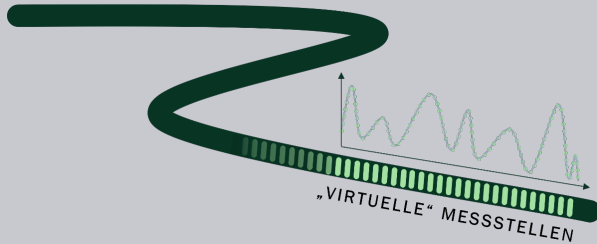
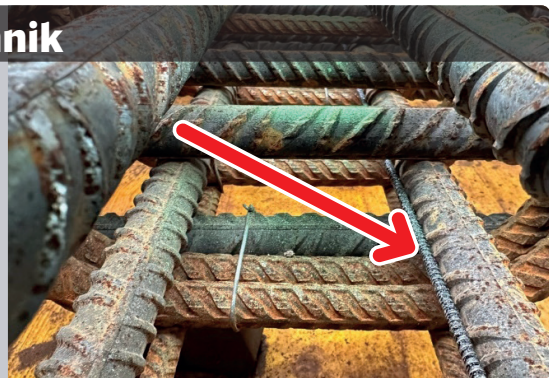


Textil- & Carbonbeton



Messtechnik

FASEROPTISCHER SENSOR



3. UHFB



3.1 Beschreibung UHFB

Zementgebundener Ultra-Hochleistungs-Faserverbund-Baustoff (UHFB) ist ein Verbundbaustoff aus Zement, Zusatzstoffen, feiner Gesteinskörnung, Wasser, Zusatzmitteln und einer grossen Menge von Kurzfasern (aus Stahl), das durch seine hohe Packungsdichte flüssigkeitsdicht und somit tragfähig sowie abdichtend ist. Die Materialeigenschaften ermöglichen geringe Schichtstärken, hohe Dauerhaftigkeit und kurze Erhärtungszeiten, was UHFB ideal für Anwendungen bei der Ertüchtigung von bestehenden Infrastrukturbauwerken wie Brücken sowie für den Neubau macht. In der Schweiz ist die UHFB-Bauweise seit über 15 Jahren etabliert, einschließlich umfassender Normen und Prüfstandards. Deutsche Pilotprojekte wurden bereits erfolgreich umgesetzt, sodass der Werkstoff auch hier bald zur Regelbauweise werden kann. Eine Zulassung beim DIBt ist eingeleitet, und eine entsprechende DAfStb-Richtlinie ist in Entwicklung.



3.2 Einsatzzwecke, Vorteile und Risiken

Bei der Herstellung und Verarbeitung von UHFB sind acht Schlüsselfaktoren entscheidend:

1. **Konstruktion:** Schlanke, fugenlose Designs und gezielter Materialeinsatz zur Optimierung der Bauweise.
2. **Rezeptur und Mischvorgang:** Strikte Einhaltung der Qualitätsstandards, idealerweise mit mobilen Mischanlagen zur Vermeidung von Transportverzögerungen und durch mechanisierte Einbaumethoden.
3. **Oberflächenvorbereitung:** Gleichmäßige Oberflächen mittels Hochdruckwasserstrahlen.
4. **Vornässen:** Ausreichendes Vornässen des Untergrundes, um einen kraftschlüssigen Haftverbund der UHFB-Schicht auf dem Betonuntergrund sicherzustellen.
5. **Verarbeitung:** Verarbeitungszeit von 90–120 Minuten, Frisch-UHFB kann sowohl fließfähig (für den Einbau in Schalungen) als auch mit thixotropem Verhalten (für die Herstellung von Gefällen auf Brückenplatten) eingestellt werden.
6. **Gleichmäßiges Abziehen:** Selbstverdichtend, erfordert aber gelegentlich manuelle Glättung.
7. **Geschultes Personal:** Einbau sollte von geschultem Personal und erfahrenen Überwachern erfolgen.
8. **Nachbehandlung:** Unverzügliche Nachbehandlung, z. B. mit Wachssiegelung, im Winter durch beheizte Matten ergänzt.

Durch die hohe Dauerhaftigkeit (>100 Jahre) und Wartungsarmut (u.a. Schutz gegen Rissbildung und Chloride) ermöglicht UHFB einen minimalen Instandhaltungsbedarf und reduzierte Bauzeiten bei Instandsetzungen.



3.3 Chancen für Ökologie, Ökonomie und Soziales

UHFB bietet nachhaltige Lösungen für die Erhaltung der Infrastruktur der Deutschen Bahn:

- **CO₂-Reduktion:** Geringe Bewehrungsgrade verringern den CO₂-Ausstoß.
- **Instandsetzung:** Erhalt bestehender Bauwerke reduziert Bauschutt und fördert effizienten Materialeinsatz.
- **Optimierte Geometrien:** Geringe Schichtstärken führen zu ressourcenschonendem Materialverbrauch.
- **Energieeinsparungen:** Minimale Transportmengen und lokale Verarbeitung senken den Energiebedarf.
- **Längere Lebensdauer:** Nutzungsdauer über 100 Jahre reduziert Wartungsaufwand.
- **Recyclingfähigkeit:** UHFB kann umweltfreundlich recycelt werden.

Kosten: Relativ hohe Primärkosten für den Baustoff (ca. 2500 € / m³) amortisieren sich durch reduzierte Materialmengen, vereinfachte und beschleunigte Bauverfahren mit geringeren Nutzerkosten sowie einen geringen künftig zu erwartenden Unterhaltsaufwand.

Regulatorische Maßnahmen: Klare Regularien sind notwendig, um den Umgang mit UHFB zu optimieren. Dazu gehören Vorversuche, Qualitätskriterien, und die Übernahme bewährter Prüfverfahren aus der Schweiz. Eine enge Zusammenarbeit zwischen allen Beteiligten ist essenziell.



3.4 Anwendungsbeispiel

Im Sommer 2024 wurden auf der Bahnstrecke von Luzern nach Immensee im Zuge eines Infrastrukturprojekts von der SBB, 10 kleinere Viadukte Instandgesetzt. Dabei kam der Werkstoff UHFB zum Einsatz. Mit den 8cm schlanken Fahrbahntrögen, wurde auf einem vorbereiteten Untergrund, das System

ausgelegt und kraftschlüssig über die Anschlussbewehrung miteinander verbunden, siehe Abbildung 3.

Durch diese Methode und den damit verbundenen Werkstoffeinsatz, kann innerhalb einer Wochenendsperrpause eine der 10 Tragwerke jeweils saniert werden. Durch den Einsatz von mehreren Bau-Trupps konnten so in insgesamt 15 Tagen (12 Tage Totalsperrung und 3 Tage Wochenendsperrpause) alle Gewölbe saniert werden.



Abbildung 3: Bau von UHFB-Fertigteil-Fahrbahntrögen auf 10 kleinen Gewölbebrücken auf der Strecke von Luzern nach Immensee (Schweiz) – Quelle: Eugen Brühwiler (EPFL-Lausanne), Herbert Fridl (SBB CFF FFS)

4. Carbonbeton



4.1 Beschreibung Carbonbeton

Textilbeton ist ein moderner Verbundwerkstoff aus Beton und nicht-metallischer Bewehrung auf Basis von Hochleistungsfasern (z. B. Glas-, Carbon- oder Aramidfasern). Die Fasern werden zu Rovings gebündelt, mit Polymeren getränkt und optional mit Epoxidharz beschichtet, was die Festigkeit und den Verbund zur Betonmatrix verbessert. Textilbeton, auch Carbonbeton genannt, zeichnet sich durch hohe Zugfestigkeit und Korrosionsbeständigkeit aus, was ihn besonders langlebig und für Bauwerke unter Chloridbelastung geeignet macht. Anwendungen umfassen Neubau und Instandsetzung.



4.2 Einsatzzwecke, Vorteile und Risiken

Carbonbeton hat die Entwicklungsphase abgeschlossen und wird in Hochbau und Verkehrssektor eingesetzt. Er bietet Vorteile bei der Verstärkung bestehender Bauwerke in Kategorie 4, wo wirtschaftliche Instandsetzungen oft nicht mehr möglich sind. Die Anwendung ähnelt herkömmlichen Instandsetzungsmörteln, ist jedoch witterungsunabhängig mit Anwendungstemperaturen von 5 °C bis 30 °C und Schichtdicken von 20 bis 35 mm.

Die textile Bewehrung ermöglicht Anpassungen an komplexe Geometrien, während Carbonbeton durch hohe Langlebigkeit (bis zu 200 Jahre) und Korrosionsbeständigkeit überzeugt. Rissbildung wird durch Carbonfaser kontrolliert, wodurch die Schadstoffeinträge minimiert werden. Modernes Monitoring zur frühzeitigen Identifikation von Schwachstellen optimiert die Instandhaltung und erhöht die Betriebssicherheit. Risiken in Planung und Umsetzung sind zu beachten.

- **Kosten:** Höhere Materialkosten im Vergleich zu herkömmlichen Baustoffen könnten Budgets überschreiten, während langfristige Einsparungen schwer prognostizierbar sind.
- **Zeit:** Genehmigungen (UiG, ZiE) und notwendige Schulungen können zu Verzögerungen im Bauablauf führen.
- **Qualität:** Unsachgemäße Verarbeitung kann die erwartete Langlebigkeit gefährden, insbesondere hinsichtlich Rissbildung.
- **Planung:** Exakte statische Berechnungen sind notwendig, da unvorhergesehene Herausforderungen auftreten können.
- **Genehmigungsverfahren:** Zusätzliche Prüfungen können den Planungsprozess verlängern, insbesondere in der Bahninfrastruktur.

Frühzeitige Maßnahmen zur Risikominderung sind erforderlich, um technische, zeitliche und finanzielle Risiken zu minimieren.



4.3 Chancen für Ökologie, Ökonomie und Soziales

Die CO₂-Bilanz von Carbonbeton ist im Vergleich zu Stahlbeton deutlich besser, insbesondere wenn R-Beton (Ökobeton) verwendet wird, dessen Herstellung mit geringeren CO₂-Emissionen verbunden ist. Bei unveränderten Querschnitten führt der Austausch der Stahlbewehrung durch Carbon nur zu minimalen Verbesserungen; eine signifikante Reduktion der CO₂-Emissionen und des Materialverbrauchs wird durch die Reduzierung der Betondeckung (von 3-6 cm auf 1-3 cm) erreicht. Carbonbeton kann im Kreislaufsystem recycelt werden, da Beton und Carbon getrennt werden können. Recycelte Carbonbewehrungen sind bereits in der Entwicklung. Im Kostenvergleich sind die anfänglichen Einsparungen gering, wenn lediglich die Bewehrung gewechselt wird. Die Vorteile zeigen sich jedoch, wenn die spezifischen Möglichkeiten von Carbonbeton genutzt werden:

- Längere Nutzungsdauer und geringere Instandhaltungskosten.
- Über 60 % weniger CO₂-Emissionen.
- Geringere Kosten für Ersatzneubauten durch verstärkte Brücken.

Zusätzlich trägt die Verwendung von Carbonbeton zur Nachhaltigkeit bei, indem Baustoffreserven geschont werden und damit der Ausstoss von Treibhausgas reduziert wird.



4.4 Anwendungsbeispiel

Im Rahmen eines Pilotprojekts wurde an einem 100 Jahre alten Viadukt eine textilbewehrte Rückenabdichtung mit nichtmetallischer Carbonbewehrung und Acrylatrealisation implementiert. Die Abdichtung erreicht Rissbreiten unter 0,1 mm und ist damit als dicht klassifiziert.

In einem ersten Schritt wurde das Viadukt freigelegt und anschließenden mit einem Hochdruckwasserstrahlverfahren gereinigt. Im nächsten Schritt wurden Unebenheiten beseitigt und die erste Schicht der Polymer-Kristallinen-Mörtelstruktur wurde aufgebracht. In diese Lage wurde die Kohlefaser-Bewehrung eingelegt. In einem mehrlagigen Verfahren wurde so die neue Abdichtung aufgebracht und seit dem wird der Abtrocknungsprozess des Tragwerks über ein Monitoringsystem überwacht.



Abbildung 4: Textilbeton Applikation auf dem Gewölbebrücken des Kewag-Bogens in Koblenz
– Quelle: DB InfraGO AG, Pelka

5. Öko-Beton



5.1 Beschreibung Öko-Beton

Beton ist momentan der wichtigste Baustoff im Bauwesen, doch seine Produktion verursacht hohe CO₂-Emissionen, insbesondere durch die Zementherstellung. Die Beton- und Zementindustrie hat daher Maßnahmen zur CO₂-Reduktion ergriffen, wie die Reduktion des Klinkeranteils im Zement und den Einsatz CO₂-reduzierter Zemente, die ohne Qualitätsverlust angewendet werden können. Öko-Beton nutzt solche Zemente sowie Recycling-Zuschlagstoffe, wodurch der CO₂-Ausstoß weiter gesenkt wird. In Österreich erhielt Leube als erster Hersteller eine Zulassung für den CO₂-armen „Leube GreenTech“ Zement, der 25 % weniger CO₂ als herkömmlicher Zement verursacht.



5.2 Einsatzzwecke, Vorteile und Risiken

Öko-Beton erfordert keine Änderungen im herkömmlichen Planungsprozess und eignet sich besonders für massive Bauteile, da der geringere Klinkergehalt im Zement eine reduzierte Hydrationswärme erzeugt. Als Transportbeton ist er zudem länger verarbeitbar, was bei längeren Lieferwegen oder hohen Außentemperaturen von Vorteil ist. Derzeit deckt er jedoch nicht alle Expositionsklassen ab, da die Norm den Einsatz von CO₂-armen Zementen und Recycling-Zuschlägen in bestimmten Bereichen einschränkt, was sich jedoch zukünftig ändern könnte.

Der Bauablauf bleibt weitgehend unverändert, wobei die Frühfestigkeiten geringfügig niedriger ausfallen, sodass Ausschulfristen sorgfältig berücksichtigt werden müssen. Zukünftige Generationen klinkerarmer Zemente sollen vergleichbare Festigkeitsentwicklungen wie herkömmliche Zemente ermöglichen, wodurch sich die Ausschulzeiten verkürzen lassen. Im Bahnbau erfordert Öko-Beton keine Anpassungen gegenüber herkömmlichem Beton. Bei der Verwendung von Fertigteilen aus Öko-Beton sind jedoch Bauzeitverkürzungen möglich, da längere Ausschulfristen im Fertigteilwerk ausgeglichen werden. Die Dauerhaftigkeit bleibt bei normgerechter Anwendung uneingeschränkt.

- **Marktengpass:** Hoher Verbrauch von Zusatzstoffen für die Zementproduktion könnte zu einem Mangel auf dem Markt führen.
- **Regelung von klinkerarmen Zementen:** Derzeit unzureichende Regulierung; es existieren teilweise Zulassungen für CO₂-arme Zemente.
- **Zukünftige Normen:** In Deutschland wird in naher Zukunft (1-2 Jahre) eine Norm erwartet, die den Einsatz klinkerarmer Zemente regelt.
- **Risiko der Normenentwicklung:** Gefahr, dass die Normenentwicklung hinter den praktischen Anforderungen zurückbleibt, was Herausforderungen für die Anwendung mit sich bringt.



5.3 Chancen für Ökologie, Ökonomie und Soziales

CO₂-Einsparung: Der Vergleich mit herkömmlichen Zementen zeigt eine CO₂-Einsparung von 25 %. Neue Generationen klinkerarmer Zemente haben das Potenzial, diesen Wert weiter zu steigern.

Recycling-Zuschläge: Bei der Verwendung von Recycling-Zuschlägen werden bestehende Gebäude abgetragen, Betonbauteile zerkleinert und nach der Aufbereitung als Zuschlagstoffe wiederverwendet. Dies reduziert die Notwendigkeit für den Abbau neuen Schotters.

Einsatz von klinkerarmen Zementen: Klinkerarme Zemente können ohne Einschränkungen auch in Kombination mit Recycling-Zuschlägen eingesetzt werden.

Kostenstruktur: Die Kosten für klinkerarmen Zement sind vergleichbar mit herkömmlichem Beton, da deren Preis nicht höher ist. Längere Ausschulfristen können jedoch in bestimmten Bereichen zu höheren Kosten führen, die durch Vorausplanung kompensiert werden können.

Festigkeitsentwicklung: Zukünftige Generationen klinkerarmer Zemente werden vergleichbare Festigkeitsentwicklungen wie herkömmliche Zemente aufweisen, wodurch längere Ausschulfristen in Zukunft nicht mehr erforderlich sein werden.

Dauerhaftigkeit: Öko-Beton weist eine höhere Widerstandsfähigkeit gegenüber chemischen und klimatischen Einflüssen auf, was zu einer Erhöhung der Nutzungsdauer im Vergleich zu herkömmlichem Beton führt.



5.4 Anwendungsbeispiel

Der CEM II/C-M (S-LL) erfüllt eine gleichbleibende hohe Funktionalität und Festigkeitsentwicklung im Beton – die Ausschulzeiten und damit verbunden der gleichbleibende Baufortschritt sind unverändert gegenüber dem Vergleichszement. Durch die niedrige Wärmeentwicklung bei der Erhärtung ist eine schwindungsarme Nacherhärtung des Betons gegeben.



Zwei Jahre nach dem Hochwasser in Hallein (Tennengau) wurde als letzter Bauabschnitt das Rückhaltebecken der WLW – Sperre Kleinkirchentälgraben – mit dem CEM II/C-M (S-LL) im Jahre 2023 fertiggestellt. Ein großes Hochwasser wie 2021, als die gesamte Altstadt überflutet wurde, gilt damit künftig als ausgeschlossen. Im Ernstfall kann das neue Rückhaltebecken bis zu 40 Millionen Liter Wasser fassen. Das Rückhaltebecken im Kleinkirchentäl ist eines von drei Bauwerken. Insgesamt hat der Kotbach einen Zulauf aus vier Bächen. Schon Ende 2021 wurde das Rückhaltebecken mit 80 Millionen Liter Fassungsvermögen beim Oberlauf fertiggestellt.



Im Zuge einer verifizierten Umwelt-Produktdeklaration konnte die CO₂-Einsparung um über 21 % gegenüber dem Vergleichszement (CEM II/B-M (S-LL) 42,5 N (Universal Zement)) nachgewiesen werden.

Abbildung 5: Kleine Tal-Sperre bei Kleinkirchentälgraben (Österreich) mit dem GreenTech Kombi Zement mit einem Anteil von 380 Kg CO₂ pro Tonne Zement und einer 25%igen Reduktion gegenüber normalen Transportbeton – Quelle: Leube

6. Innovatives Monitoring am Beispiel von Faseroptik



6.1 Beschreibung des innovativen Monitorings

Die traditionelle Brückeninspektion beruht fast ausschliesslich auf visuellen Kontrollen durch Ingenieure, die zwar gängig, jedoch begrenzt in ihrer Genauigkeit sind, da kleine Risse oder Veränderungen übersehen werden können. Zudem erfordern handnahe Prüfungen erhebliche Ressourcen, insbesondere bei schwer zugänglichen Bauwerken. Moderne Technologien, insbesondere verteilte faseroptische Messsysteme (DFOS, eng. distributed fibre optic sensing), bieten eine Lösung, indem sie eine kontinuierliche, automatisierte Überwachung ermöglichen. Diese Systeme verwenden Glasfasern zur Erfassung von physikalischen Größen wie Dehnung, Temperatur und Vibrationen über große Strecken, was eine umfassendere Datensammlung im Vergleich zu punktuellen Messungen mit herkömmlichen Sensoren darstellt.



6.2 Einsatzzwecke, Vorteile und Risiken

Die verteilten faseroptischen Messungen (DFOS) bieten eine Vielzahl von Möglichkeiten zur Zustandsüberwachung und Structural Health Monitoring von Brücken und Infrastrukturbauwerken. Durch die kontinuierliche Messung von Dehnung, Vibration und Temperatur entlang der gesamten Länge eines Sensors, ermöglichen sie eine detaillierte Analyse von Veränderungen, die herkömmliche punktuelle Sensoren nicht leisten können, und tragen damit dazu bei, die Sicherheit und Nutzungsdauer von Brücken zu erhöhen sowie die Instandhaltungskosten zu minimieren.

Erkennung von lokalen Schäden und Rissen

Eines der Hauptziele des Brückenmonitorings ist die frühzeitige Erkennung von Schäden, die das Bauwerksintegrität beeinträchtigen könnten. DFOS-Systeme können bereits kleinste Dehnungen oder Veränderungen detektieren, die auf das Auftreten von Rissen oder Materialermüdung hinweisen. Durch die hohe räumliche Auflösung von DFOS-Systemen, können mikroskopische Risse oder lokale Defekte erkannt werden, bevor sie zu sichtbaren Schäden führen. Diese Technologie ermöglicht die präventive Wartung und trägt zur Vermeidung kostenintensiver Reparaturen bei. Darüber hinaus ermöglichen DFOS-Messungen die präzise Ortung von Schäden entlang der Glasfaser, wodurch die betroffenen Bereiche gezielt untersucht und repariert werden können.

Dehnungsüberwachung

Die Dehnungsmessungen sind ein zentraler Bestandteil des Structural Health Monitorings (SHM) von Brücken. DFOS-Systeme bieten eine lückenlose Messung der Dehnung entlang der Brückenbauwerk, was insbesondere bei langfristigen Belastungen durch Verkehr und Umweltfaktoren wichtig ist. Faseroptische Sensoren ermöglichen die Messung sowohl statischer als auch dynamischer Dehnungen, somit kann zum Beispiel das Verhalten der Brücke unter verschiedenen Verkehrsbedingungen detailliert untersucht werden.

Vibrationserkennung und Verkehrsüberwachung

Neben den Dehnungsmessungen können DFOS-Systeme auch zur Erfassung von Vibrationen und akustischen Signalen verwendet werden, insbesondere durch Distributed Acoustic Sensing (DAS). Damit können die durch Fahrzeuge verursachten Vibrationen gemessen werden, was die Überwachung von Verkehrslasten und die Analyse von deren Auswirkungen auf die Brücke in Echtzeit ermöglicht. DAS-basierte Systeme sind in der Lage plötzliche Ereignisse, z. B. Spanndrahtbrüche oder Unfälle, sofort zu erfassen und eine Alarmierung in Echtzeit zu ermöglichen.

Integration in bestehende Überwachungsprotokolle

Ein großer Vorteil von DFOS-Systemen ist die einfache Integration in bestehende Überwachungs- und Instandhaltungsprotokolle. Die Technologie kann entweder als eigenständiges System oder in Kombination mit anderen Sensortechnologien (wie drahtlosen Sensoren oder traditionelle Messgeräte) verwendet werden, um ein hybrides, umfassendes Überwachungssystem von Brückenbauwerken zu ermöglichen. Darüber hinaus können beispielsweise die aus den Messergebnissen automatisch lokalisierte Rissstellen mit den Ergebnissen von handnahen Bauwerksprüfungen verglichen werden. Moderne Datenverarbeitungssysteme können die kontinuierlich erfassten Daten analysieren und potenzielle Anomalien automatisch identifizieren, allerdings soll betont werden, dass das Dauermonitoring mit DSS sowie DAS-Messeinsätze große Menge von Daten erzeugen.



6.3 Chancen für Ökologie, Ökonomie und Soziales

Ökologische Chancen

- **Ressourcenschonung und Nachhaltigkeit:** Durch den Einsatz von DFOS-Messsystemen können Schäden frühzeitig erkannt und präventive Wartungsmaßnahmen eingeleitet werden, bevor schwerwiegende Schäden entstehen. Dies verlängert die Nutzungsdauer von Brücken und reduziert die Notwendigkeit für umfassende, ressourcenintensive Reparaturen oder sogar einen vorzeitigen Abriss und Neubau.
- **Reduktion von CO₂-Emissionen:** Traditionelle Brückenwartungen und Reparaturen erfordern oft umfangreiche Bauarbeiten, die mit einem hohen Energieverbrauch und CO₂-Emissionen verbunden sind. Durch präventive Wartung und optimierte Instandhaltungspläne, die auf den kontinuierlich erhobenen Daten von DFOS basieren, kann der CO₂-Fußabdruck verringert werden.

Ökonomische Chancen

- Kosteneffizienz durch präventive Maßnahmen
- Reduzierte Betriebskosten durch Reduzierung von teuren, manuellen Inspektionen
- Reduzierte Verkehrseinschränkungen oder Umleitungen

Soziale Chancen

- Vermeidung von Verkehrsunterbrechungen
- Erhöhte Sicherheit, aber auch Transparenz und Vertrauen
- Förderung von Innovation



6.4 Anwendungsbeispiel

Die Eisenbahnüberführung über die Oder besteht aus einer Netzbogenbrücke mit Carbonhänger mit einer Stützweite von 130 m (Achsen 10 bis 20) und einem Vorlandfeld mit Stützweiten von jeweils ca. 45 m. 16 faseroptische DFOS-Sensoren mit einer Gesamtlänge von 1600 m wurden direkt in der Stahlbetonfahrbahnplatte zur Überwachung der Rissentwicklung eingebettet. Auf Basis der erfassten Dehnungsänderungen an bestimmten Positionen war es möglich, bereits vorhandene Mikrorisse in der Stahlbetonplatte präzise zu lokalisieren. Diese Mikrorisse wurden in der Draufsicht der Platte eingetragen, wodurch auf automatisierte Weise eine Art Risskataster entstand. Dieses Kataster ermöglicht eine systematische Erfassung und Visualisierung der Mikrorisse und bietet die Grundlage für eine kontinuierliche Überwachung des Bauwerkszustands.

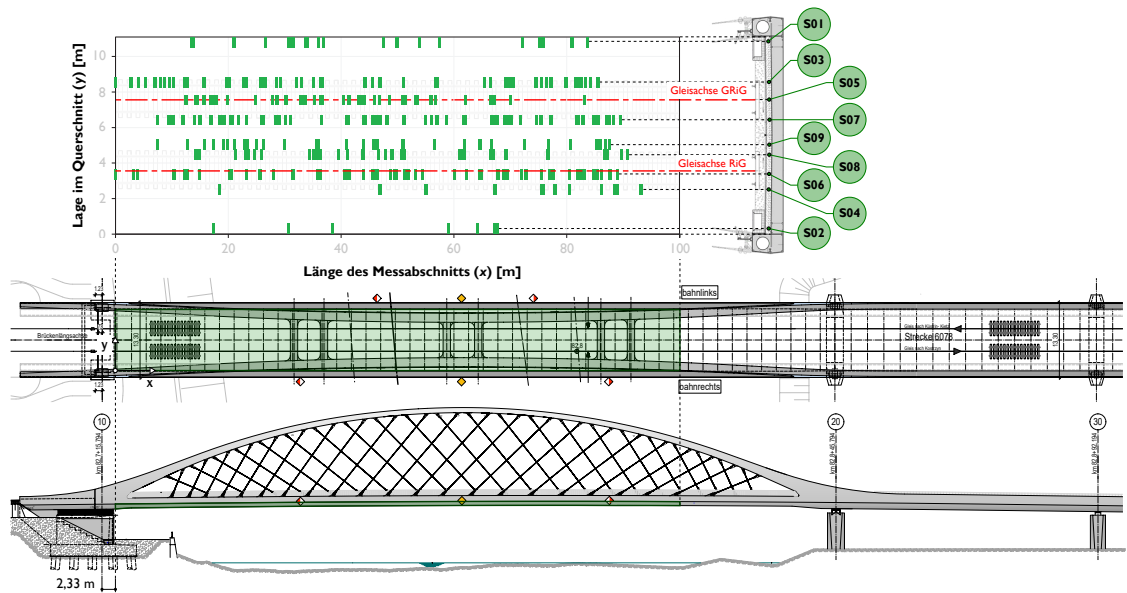
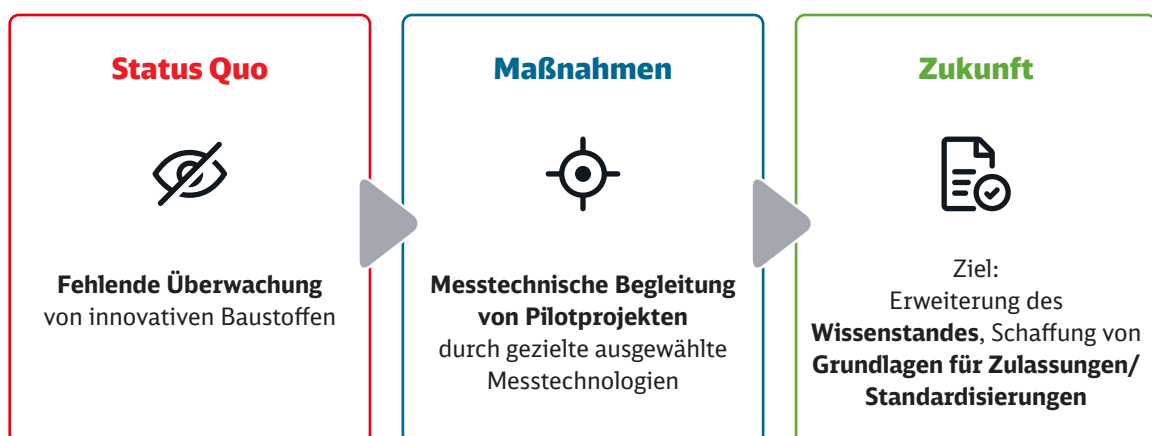
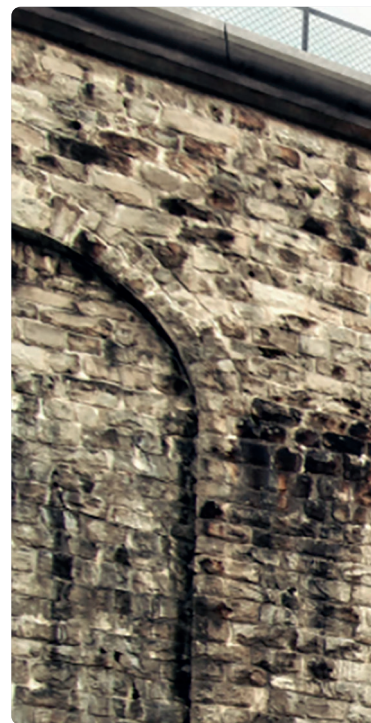


Abb.6: Eisenbahnüberführung Oder bei Küstrin mit DFOS-Überwachung im Bereich der Fahrbahn – Quelle: Folab

7. Fazit und Gesamtbeurteilung

Schafft man die aufgezeigten Zeitfresser und Probleme aus dem Weg, werden die Chancen für die Anwendung innovativer Baustoffe und Methoden erhöht. Folgende Maßnahmen können dazu beitragen:





DB InfraGO AG
Zukunfts-Initiative Bahnbau
Produktivität & Innovation

ZIB-Team „Baustoffe der Zukunft“
München, den 20.11.2024

Bildnachweis:
Titelbild – Quelle: SBB.CH/Wipkinger Viadukt
UHFB (S. 9) – Quelle: Prof. em. Eugen Brühwiler, EPFL Lausanne
Öko-Beton (S. 9) – Quelle: Leube
Textil- & Carbonbeton (S. 9) – Quelle: DB InfraGO, Pelka
Messtechnik (S. 9) – Quelle: Folab