

Bau einer Bahnbrücke aus bewehrtem UHFB

Weltweit erste Bahnbrücke aus UHFB auf einer Hauptlinie

Herrn Prof. Dipl.-Ing. Dr.phil. Dr.techn. Dr.-Ing. E.h. Konrad Bergmeister zu seinem 60. Geburtstag gewidmet

Am 11. November 2017 wurde die weltweit erste Bahnbrücke aus bewehrtem UHFB auf einer Hauptlinie in Betrieb genommen. Das Bauvorhaben der Schweizerischen Bundesbahnen (SBB) wurde im Rahmen des Ersatzneubaus einer doppelspurigen Bahnbrücke kurzer Spannweite bei Sempach im Kanton Luzern, Schweiz, realisiert. UHFB ist ein neuartiger faserverstärkter, zementgebundener Verbundbaustoff, der durch seine hohe Festigkeit und Dichtigkeit ideale Voraussetzungen für den Einsatz bei Infrastrukturbauwerken mit sich bringt. Neben geringeren Lebenszykluskosten können durch eine modulare Bauweise mit hohem Vorfabrikationsgrad kürzere Bauzeiten realisiert werden, womit geringere Betriebseinschränkungen verursacht werden. An der UHFB-Brückenplatte einer Spannweite von 6,0 m wurde ein Monitoringsystem installiert, um das Tragverhalten bei Zugüberfahrten zu erfassen. Erste Ergebnisse der Messungen bestätigen die erwarteten Werte, die deutlich unter den berechneten Kenngrößen liegen. Dieser Aufsatz beschreibt den Entwurf, die Bemessung, die Ausführung und das Monitoring dieser neuartigen Brückenkonstruktion.

1 Einleitung und Zielsetzung

1.1 Bautechnikgeschichtlicher Kontext

Seit jeher haben neuartige Baustoffe zu Fortschritten im konstruktiven Ingenieurbau geführt. Im Jahre 1897 wurde in der Schweiz die erste Bahnbrücke aus „Eisenbeton“ in Betrieb genommen. Die Konstruktion wurde vom weltberühmten Eisenbetonpionier FRANÇOIS HENNEBIQUE (1842–1921) für die Straßenunterführung „Creux-du-mas“ der zweigleisigen Bahnlinie bei Rolle im Kanton Waadt entworfen und gebaut (Bild 1), [1].

Der im Jahr 2001 ersetzte Brückenträger bestand aus einer Rippenplatte mit vier 20 cm schmalen und 50 cm hohen Unterzügen für eine Spannweite von 4,5 m. Diese Unterzüge enthielten einzelne „Eisenstäbe“ von großem Durchmesser und vertikale Blechstreifen als Querkraftbewehrung. Der damalige Eisenbeton verstand sich als Betonkonstruktion bestehend aus feinkörnigem Beton, dem einzig in zugbeanspruchten Zonen Stabbewehrung zugelegt wurde. Diese Konstruktionsweise kann als Vorläufer der in diesem Aufsatz behandelten UHFB-Bauweise verstanden werden.

1.2 Zusammensetzung und Eigenschaften von UHFB

In den vergangenen dreißig Jahren wurden die Eigenschaften faserverstärkter, zementgebundener Baustoffe

Design and construction of a railway bridge in reinforced UHPFRC – World's first UHPFRC bridge on a main railway line

On November 11, 2017, the world's first railway bridge built in reinforced UHPFRC on a main railway line lane was put in service. The building project of the Swiss Federal Railways was realized within a replacement project of a double-lane railway bridge of short span at Sempach in the Canton of Lucerne, Switzerland. UHPFRC is a novel cementitious fibre-reinforced composite material of high strength and durability that provides ideal properties for application to structures of transportation infrastructure. In addition to lower life cycle costs, the modular construction method including a high prefabrication degree allows for shorter construction time and thus reduced service restrictions. The UHPFRC structure with a span of 6.0 m was equipped with a monitoring system to capture the structural behavior due to train crossings. First results of the measurements confirm the expected values that lie significantly below the calculated values. This article describes the design, dimensioning, execution and monitoring of this novel bridge structure.

deutlich verbessert, woraus die sogenannten „ultra-hochleistungs-, zementgebundenen faserverstärkten Verbundbaustoffe“, kurz „UHFB“, entstanden sind. Der in diesem Aufsatz beschriebene UHFB kann als in Deutschland landläufig mit „UHPC“ bezeichneter Baustoff mit den heute bestmöglichen Materialeigenschaften verstanden werden.

UHFB ist weder Beton noch Stahl, sondern ein neuartiger Verbundbaustoff. UHFB besteht aus einer zementgebundenen Matrix aus reaktiven Feinstoffen (v. a. Zement) und harten Partikeln mit einer maximalen Größe von 1 mm. Diese Matrix wird durch schlanke Kurzfasern in hoher Dosierung verstärkt. Wegen des hohen Elastizitätsmoduls sind diese Fasern aus Stahl, 15 mm lang und 0,2 mm dick und machen mindestens 3% des Baustoffvolumens aus. Um die Tragfähigkeit und Robustheit zusätzlich zu erhöhen, wird UHFB mit Betonstahl und Spannstahl bewehrt und diese Bewehrung gezielt nur in der Haupttragrichtung eingelegt. In Anlehnung an den Begriff „bewehrter Beton“ spricht man in diesem Fall von „bewehrtem UHFB“.

Folgende Eigenschaften zeichnen UHFB aus:

- Dauerhaftigkeit: Die Packungsdichte der Komponenten ist infolge Optimierung der Partikelgrößen sehr hoch und der Wasserzementwert beträgt in der Regel 0,15. Deshalb wird das bei der Herstellung des UHFB



Bild 1 Straßenunterführung „Creux-du-Mas“ (1897), erste Bahnbrücke in der Schweiz aus Eisenbeton: a) Ansicht, b) Detail (Fotos von 1996, E. BRÜHWILER)
Road underpass „Creux-du-Mas“ (1897), first railway bridge in Switzerland in reinforced concrete: a) view, b) detail (Photos from 1996, E. BRÜHWILER)

zugegebene Wasser beim Erhärten vollständig für die Zementhydratation verbraucht. Damit kann kein eigentlicher Trocknungsvorgang stattfinden, bei dem kommunizierenden Kapillarporen (wie bei Beton) gebildet werden. Entsprechend kann kein Wassereintritt von außen in den UHFB erfolgen, womit Schädigungsmechanismen wie Stahlkorrosion oder chemische Reaktionen zwischen Baustoffkomponenten nicht auftreten können. UHFB ist auch wasserdicht unter Zugbeanspruchung bis 1‰ Dehnung, womit eine hohe Dauerhaftigkeit gewährleistet ist.

- Verformungen: Der Elastizitäts-Modul von UHFB bleibt mit Werten zwischen 45 und 50 GPa vergleichsweise gering, weshalb beim Tragwerksentwurf in erster Linie Querschnitte mit hohen Trägheitsmomenten entwickelt werden müssen. Verformungen aus Kriechen und Schwinden sind ähnlich wie für Beton, wobei bereits 2/3 des Schwindens innerhalb der ersten 30 Tage erfolgt. Es ist möglich, Kriech- und Schwind-

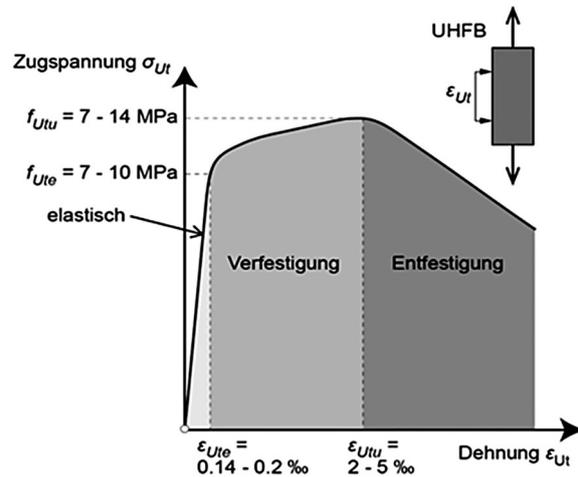


Bild 2 Zugverhalten von UHFB mit ausgeprägtem Verfestigungs- und Entfestigungsverhalten
Tensile behavior of UHPFRC showing significant hardening and softening behavior

verformungen durch eine thermische Nachbehandlung der vorgefertigten Bauteile weitgehend zu eliminieren.

- Druckverhalten: UHFB verhält sich linear-elastisch bis etwa 80% der Druckfestigkeit, wobei das nachfolgende nichtlineare Verhalten wenig ausgeprägt ist. Die Druckfestigkeiten variieren zwischen 150 und 200 MPa. Die begrenzte Verformbarkeit von UHFB wird bei der Bemessung mit einem entsprechenden Vorhaltemaß beaufschlagt.
- Zugverhalten: UHFB verhält sich elastisch bis zu einer Grenzspannung und danach verfestigend, bis die Zugfestigkeit erreicht wird. Dieses Zugverhalten ähnelt demjenigen des Stahls, jedoch mit Dehnungs- und Festigkeitswerten, die um mindestens eine Größenordnung geringer sind (Bild 2). Ähnlich wie bei Stahl werden UHFB-Sorten über die Zugfestigkeitseigenschaften definiert.
- Zugverhalten von bewehrtem UHFB: Die Kombination von UHFB mit Bewehrungsstäben aus Stahl ermöglicht eine effiziente Erhöhung der Tragfähigkeit von Bauteilen. Das Zugverhalten von bewehrtem UHFB wird durch die Superposition des Zugverhaltens von UHFB und Betonstahl beschrieben. Bewehrter UHFB bleibt im Gebrauchszustand homogen bei gleichbleibender Steifigkeit. Der maximale Tragwiderstand eines Bauteils wird erreicht, wenn sich der UHFB verfestigt und die Stahlbewehrung zu fließen beginnt.
- Ermüdungsdauerfestigkeit: Die Ermüdungsdauerfestigkeit von UHFB und bewehrtem UHFB beträgt etwa 50% des statischen Tragwiderstands.

1.3 UHFB im konstruktiven Ingenieurbau

Die effiziente Anwendung neuartiger Baustoffe wie UHFB im konstruktiven Ingenieurbau basiert auf einem baustoffgerechten Tragwerkskonzept und beschränkt sich nicht auf den Ersatz traditioneller Baustoffe. Die

Grundidee des Bauens mit UHFB besteht darin, hochleistungsfähige Komponenten der Stahlbetonbauweise, d. h. Zement, Betonstahl, Vorspannung und vielfältige Formbarkeit, sowie der Stahlbauweise, d. h. leichte, vorgefertigte Bauteile und schnelle Baumethoden, auszunutzen und möglichst effizient zu kombinieren. Der Baustoff UHFB eröffnet neue Perspektiven und ressourcenschonende Anwendungen. Wegen seiner hohen mechanischen Festigkeit, Ermüdungsfestigkeit und Dauerhaftigkeit ist er insbesondere für stark beanspruchte Tragwerke wie z. B. für Bahnbrücken besonders geeignet.

Ähnlich wie Stahl ist UHFB ein veredelter Baustoff. UHFB-Tragwerke werden in Leichtbauweise entworfen und führen entsprechend zu präzisen Abmessungen, weshalb auf Plänen die Abmessungen in Millimetern angegeben werden. Bauteile aus UHFB sind oft aus flächigen Elementen, die als „Bleche“ bezeichnet werden können, zusammengesetzt und werden mit „Rippen“ versteift. Übliche Blechstärken betragen 30 bis 100 mm. Damit ergibt sich ein relativ geringes Eigengewicht von vorgefertigten UHFB-Bauteilen, was zu Vorteilen beim Transport und der Montage führt und einen schnellen Bauvorgang ermöglicht. Entsprechend sind in der Regel die Baukosten für UHFB-Tragwerke nicht höher als für Tragwerke aus Stahlbeton, falls das UHFB-Tragwerk mindestens dreimal leichter ist als eine Stahlbetonkonstruktion, welche die gleiche Tragfunktion erfüllt.

1.4 Projektziele

Im Bahnbereich sind robuste und unterhaltsarme Tragkonstruktionen hinsichtlich Wirtschaftlichkeit und Lebenszykluskosten vorteilhaft. Mit UHFB steht ein Baustoff zur Verfügung, der sich dank seiner vergleichsweise hohen mechanischen Festigkeit und Dauerhaftigkeit für den Einsatz bei Infrastrukturbauwerken eignet. Am 11. November 2017 wurde die Straßenunterführung Unterwalden bei Sempach als weltweit erste Bahnbrücke aus bewehrtem UHFB auf einer Hauptlinie der SBB in Betrieb genommen (Bild 3).



Bild 3 Straßenunterführung Unterwalden nach Abschluss der Bauausführung (Dezember 2017)
Road underpass Unterwalden after construction (December 2017)

Dieser Aufsatz beschreibt den Entwurf, die Bemessung und Ausführung dieser neuartigen Brückenkonstruktion mit einer kurzen Spannweite von 6,0 m. Mit dem Bau einer kleinen Bahnbrücke aus UHFB sollten grundlegende Erfahrungen bei der Bemessung und Ausführung inklusive der tatsächlich anfallenden Erstellungs- und Unterhaltskosten gemacht werden. Diese Erfahrungen werden mit den Lebenszykluskosten der bestehenden Brückenarten verglichen und daraus Empfehlungen für zukünftige Anwendungen abgeleitet.

2 Entwurf und Projektierung

2.1 Ausgangslage

Die Straßenunterführung Unterwalden liegt auf der Bahnlinie Basel – Olten – Luzern bei km 78.330 in der Nähe von Sempach. Die Bahn überquert eine Nebenstraße für Fahrzeuge, Fußgänger und Radfahrer mit einer lichten Weite von 5,0 m. Das ursprüngliche Bauwerk aus Walzträger-in-Beton(WiB)-Bauweise war in einem schadhafte Zustand. Im Jahre 2012 wurde aufgrund einer Variantenstudie eine neue Brückenplatte aus UHFB und die Instandsetzung der Stampfbetonwiderlager als Bestvariante vorgeschlagen und genehmigt. Die Hauptgründe für die Wahl einer Brückenplatte aus UHFB gegenüber einer konventionellen massiven Stahlbetonplatte waren eine höhere Wirtschaftlichkeit, leicht geringere Baukosten für das Brückentragwerk und vor allem, weil die folgenden geometrischen Randbedingungen einfacher eingehalten werden konnten:

- Die Straßenunterführung weist zur Auftriebssicherung gegenüber dem hoch liegenden Grundwasserspiegel eine massive Bodenplatte aus Beton auf. Bei einer Tieferlegung der Straße hätte die Bodenplatte abgesenkt werden müssen, was hohe Kosten verursacht hätte.
- Das Bahngleis liegt auf einem Damm und wird mit Bankethalterungen gesichert. Eine Gleishebung musste möglichst minimal ausfallen, damit die Bankethalterungen die zulässige Höhe von 1,0 m nicht überschreiten und der Damm nicht verbreitert werden muss.

2.2 Tragwerkskonzept

Die Anforderungen an das Tragwerk waren somit eine möglichst geringe Trägerhöhe sowie die Herstellung möglichst leichter Bauteile in Fertigteilbauweise für eine schnelle Bauweise, um die Sperrzeiten der Bahnstrecke zu minimieren. Diese Anforderungen und die Umsetzung von Entwurfsregeln der UHFB-Bauweise [2] führten zum Entwurf einer Konstruktion bestehend aus einer Rippenplatte und einem Randträger pro Gleis, also insgesamt vier Fertigbauteile (Bild 4).

Die HENNEBIQUE-Brücke „Creux-du-Mas“ diente als Inspiration für den Entwurf der UHFB-Rippenplatte. Die Abmessungen der Rippenplatte als einfacher Balken, d. h.



Bild 4 Randträger und Rippenplatte des Tragwerks aus bewehrtem UHFB
Edge girder and ribbed plate of the structure in reinforced UHPFRC

die Plattenstärke als Druckgurt sowie der Abstand und die Dicke der Rippen wurden derart gewählt, dass:

- (1) die für den Biegetragwiderstand erforderliche Betonstahlbewehrung mit einer Überdeckung von mindestens 15 mm eingelegt werden konnte,
- (2) genügend UHFB-Querschnitt vorhanden ist zur Aufnahme der Bemessungsquerkraft, um auf eine vertikale Betonstahlbewehrung im Auflagerbereich zu verzichten,
- (3) über die gesamte Platten Spannweite keine Querschnitte erforderlich waren und
- (4) im Plattenrandbereich die Entgleisungslasten aufgenommen werden konnten.

Diese Entwurfsziele führten zu einer 50 mm starken, in Querrichtung bewehrten Fahrbahnplatte mit 80 mm brei-

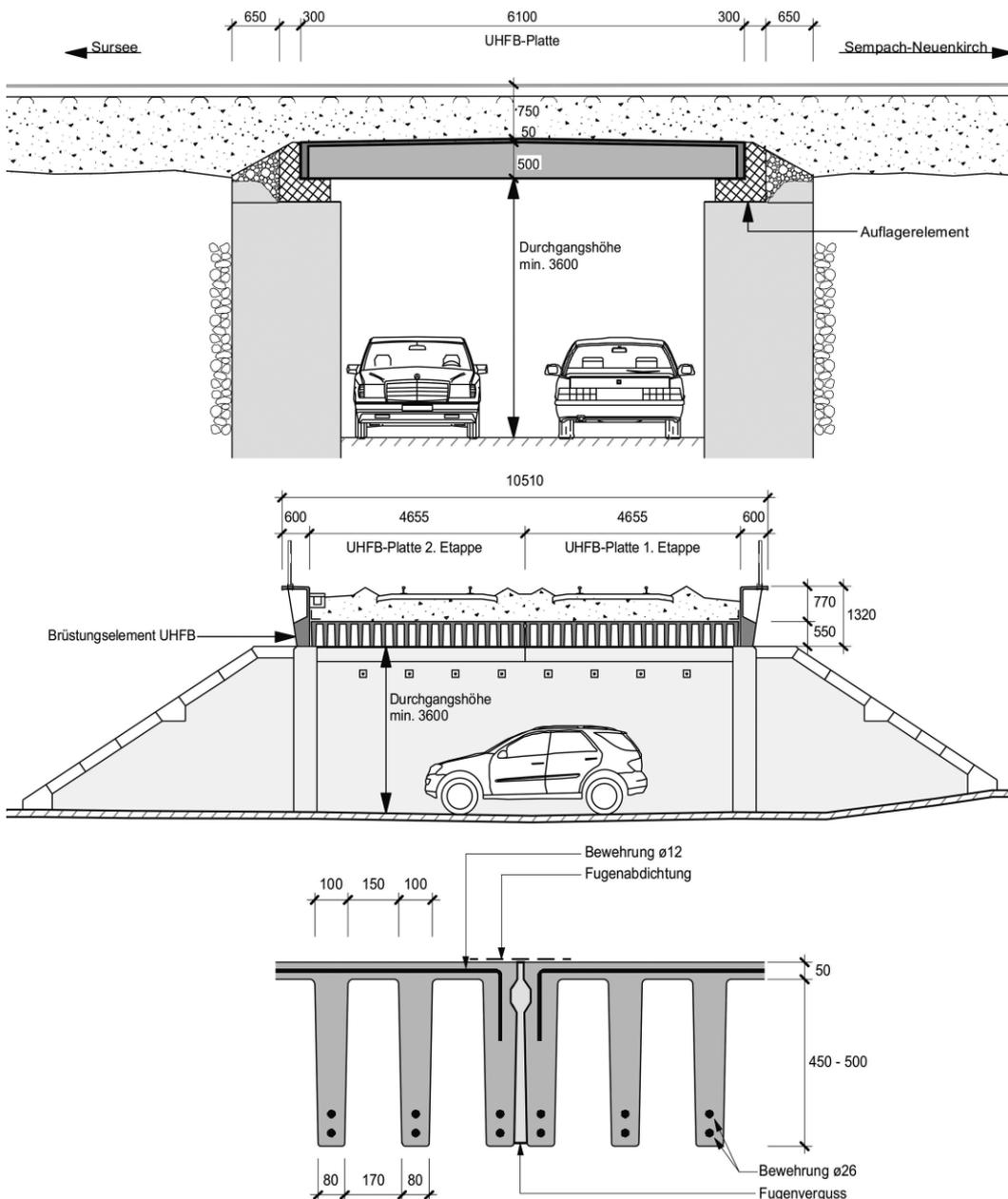


Bild 5 Ansicht, Querschnitt und Detail der Rippenplatte aus bewehrtem UHFB (Abmessungen [mm])
Elevation, cross section and detail of the ribbed plate girder in reinforced UHPFRC (Dimensions in [mm])

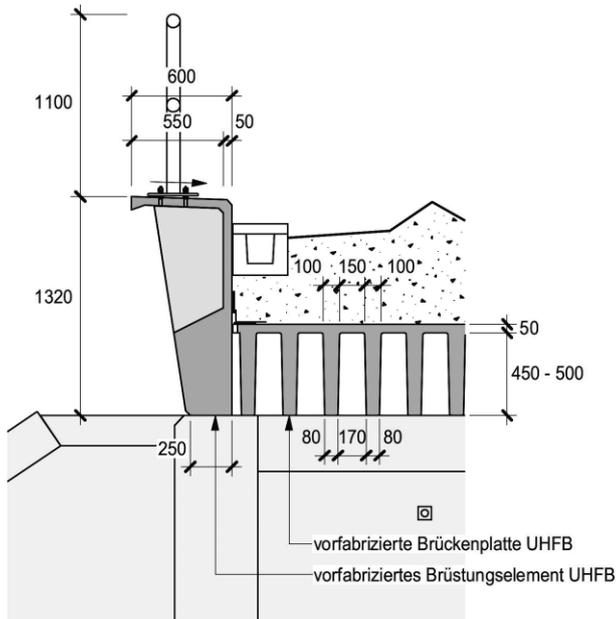


Bild 6 Querschnitt des Randträgers aus bewehrtem UHPFB (Abmessungen [mm])
Cross section of the edge girder in reinforced UHPFRC (dimensions in [mm])

ten, längs in einem Abstand von 250 mm angeordneten Rippen der Platte (Bild 5).

Der Randträger besteht aus einem massiven Randbalken im unteren Bereich zur Aufnahme der Anprallkräfte infolge der zu unterführenden Straßenfahrzeuge sowie dem monolithisch darauf aufgesetzten Randbord für das Schotterbett (Bild 6). Zudem sollte der Randträger in einer Form erscheinen, welche dem neuartigen Baustoff gerecht wird und ihn augenscheinlich macht (Bilder 3, 4 und 7).

Die Eigenschaften des UHPFB und die Randbedingungen sprachen für eine Herstellung je einer Rippenplatte pro Gleis und zweier Randträger in Fertigteilbauweise. Aus statischen Gründen wurden Rippenplatte und Randträger nicht monolithisch verbunden. Hingegen wurde die Längsfuge zwischen den beiden Rippenplatten ausgegossen und abgedichtet.

2.3 Bemessung

Die Abmessungen der entworfenen Tragwerksteile wurden unter Anwendung der üblichen Tragwerksnormen, die in der Schweiz anzuwenden sind, nachgewiesen und hinsichtlich möglichst kleiner Bauteilabmessungen optimiert. In der Schweiz sind dies die Normen SIA 260 [3] und SIA 261 [4] betreffend die Bemessungsgrundlagen respektive die Einwirkungen auf neue Tragwerke sowie das Merkblatt SIA 2052 [5] für die Festlegung der Anforderungen an den UHPFB und die Berechnung der Tragwiderstände von Bauteilen aus bewehrtem UHPFB.

Die Ermittlung der rechnerischen Tragwiderstände der UHPFB-Tragwerksteile bot keine nennenswerten Beson-



Bild 7 Seitenansicht des Randträgers aus bewehrtem UHPFB
Side view of the edge girder in reinforced UHPFRC

derheiten. Die Bemessung führte zu folgenden rechnerischen Ergebnissen und Erkenntnissen:

- Der Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit, d.h. die normative Anforderung an eine Durchbiegungsbegrenzung von $l/2000 = 3$ mm unter Bahnlasten, war für die Bemessung maßgebend. Wegen seines verfestigenden Zugverhaltens bleibt der UHPFB im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit rissfrei. Somit konnte der gesamte Querschnitt zur Ermittlung der Trägersteifigkeit mitberücksichtigt werden, wobei für den UHPFB-Querschnittsanteil, der rechnerisch im Verfestigungsbereich beansprucht war, ein reduzierter Wert für den Elastizitätsmodul angesetzt wurde.
- Die maximale Ermüdungsspannungsdifferenz der Betonstahlstäbe in den Rippen bleibt unter dem Bemessungswert von 108 MPa der Dauerfestigkeit für gerade Stäbe. Die maximale Druck- resp. Zugspannung infolge Ermüdung bleibt deutlich unter 50% der statischen Festigkeiten. Im Grenzzustand der Ermüdungssicherheit ist der UHPFB rechnerisch im Verfestigungsbereich beansprucht, und somit wurde die Ermüdungszugspannung mit einem reduzierten Elastizitätsmodul berechnet [6].
- Der Grenzzustand der Tragsicherheit ist für die andauernde Bemessungssituation hinsichtlich des Biegetragwiderstands nicht maßgebend. Mit der gewählten Rippendicke konnte der Nachweis des Querkrafttragwiderstands ohne Einlage einer vertikalen Betonstahlbewehrung erbracht werden.
- Um die sehr hohen normativen Entgleisungslasten für die außergewöhnliche Bemessungssituation aufnehmen zu können, mussten die beiden äußersten Rippen des Plattenrandbereichs mit höherfestem Betonstahl einer normativen Fließgrenze von 700 MPa bewehrt werden.
- Zur Aufnahme der normativen Anprallkraft auf den Randträger war eine starke Betonstahlbewehrung im unteren massiven Teil erforderlich. Diese Anprallkraft wird in die neue Auflagerbank und schließlich in die bestehende Widerlagerwand eingeleitet.

- Als Maßnahme zur Beherrschung der außergewöhnlichen Bemessungssituation „Brand“ wurden der UHFB-Mischung 2 kg/m^3 Polypropylen-Fasern beige-mischt, um den Abplatzwiderstand zu erhöhen.
- Hinsichtlich der Dauerhaftigkeit sind dank des dauerhaften Baustoffs UHFB keine Maßnahmen wie z. B. ein Oberflächenschutz oder eine gewisse Bewehrungsüberdeckung erforderlich. Wegen der hohen Abriebfestigkeit des UHFB war zudem auf der Brückenplatte keine zusätzliche Schutzschicht erforderlich, zumal die SBB bereits bei einigen Brückenplatten aus Stahlbeton mit dem Einbau dieser Schutzschicht aus UHFB positive Erfahrungen gesammelt hatten. Somit konnte unmittelbar nach dem Einbau der UHFB-Plattenelemente der Gleiskörper erstellt und die Brücke dem Bahnbetrieb übergeben werden.

2.4 Prüfung des Bauprojekts

Die Bemessung des UHFB-Tragwerks und das dynamische Verhalten wurden durch Prof. Dr. KAREL THOMA, HSLU Luzern Schweiz, geprüft. Diese Prüfungen bestätigten grundsätzlich den Tragwerksentwurf und die Bemessung und führten zu vereinzelt Verbesserungen des Projekts.

2.5 Nachweis der Bemessung durch Vorversuche

Im Rahmen der SBB-internen technischen Vorprüfung wurden an der Hochschule Luzern (Technik & Architektur, Kompetenzzentrum Konstruktiver Ingenieurbau) Vorversuche zum Nachweis des Tragverhaltens bis zum Bruch unter vorwiegender Biege- resp. Querkraftbeanspruchung durchgeführt. Dazu wurden zwei identische Π -Träger (Plattenstreifen mit zwei Rippen) gemäß den Ergebnissen der Bemessung und mit gleichen Abmessungen wie die geplante Brückenplatte hergestellt. Die Vorversuche bestätigten die Bemessung, indem höhere Tragwiderstände gemessen wurden als die mit den Widerstandsmodellen gemäß [5] vorhergesagten Tragwiderstände [7, 8].

Diese Versuche ergaben zudem wichtige Erkenntnisse bezüglich der effektiven Steifigkeit des bewehrten UHFB-Trägers und bestätigten die vorgesehene konstruktive Durchbildung und Bewehrungsführung im Auflagerbereich der Platte. Die Herstellung der beiden Versuchsbalken ergab zudem wertvolle Erfahrungen hinsichtlich des Baus der Schalung, der Gewährleistung der erforderlichen Bewehrungsüberdeckung, der Befestigung der Betonstahlstäbe in der Schalung sowie des Einbaus des UHFB in die Schalung.

3 Bauausführung

3.1 Herstellung der UHFB-Fertigteile

Elementwerke bzw. Fertigteilwerke besitzen die für den UHFB-Fertigteilbau benötigten Installationen wie leis-

tungsstarke Mischer, witterungsgeschützte Produktionsflächen sowie die Einrichtungen für einen präzisen Schalungsbau. Die Herstellung der im engen Abstand aneinandergereihten und leicht konisch geformten Rippen verlangte eine Präzisionsarbeit beim Bau der Schalung aus Holz und beim Verlegen der Betonstahlbewehrung. Die Verarbeitung der insgesamt 24 m^3 UHFB zur Herstellung der vier Fertigteile im Elementwerk benötigte insgesamt 13 Stunden. Die Mischdauer von UHFB hängt von der Leistungsfähigkeit des Mixers und den Komponenten der verwendeten UHFB-Mischung ab. Im vorliegenden Fall war die Mischdauer mit 15 Minuten relativ lange, was auch auf die Beigabe der Polypropylen-Fasern zurückzuführen war. Zudem erforderte die Beigabe dieser zusätzlichen Fasern eine Anpassung der Zusatzmittel, um die erforderliche Verarbeitbarkeit des Frisch-UHFB zu gewährleisten.

Der Einbau des selbstverdichtenden Frisch-UHFB in die Holzschalungen erfolgte problemlos. Das Abziehen der Oberfläche erforderte aber einen erhöhten Aufwand. Wegen der Fließfähigkeit des Frisch-UHFB musste eine Konterschalung zur Herstellung der in Längsrichtung von der Feldmitte aus um 2% geneigten Plattenoberfläche aufgesetzt werden.

Der Transport der UHFB-Fertigteile von der Fabrikationshalle zur Einbaustelle erfolgte wegen der großen Abmessungen der Fahrbahnplatte von 6,10 m Länge und 4,60 m Breite mit Sondertransporten. Um die Vorarbeiten auf der Baustelle nicht zu behindern, wurden die Fertigteilelemente erst unmittelbar vor dem Einbauwochenende angeliefert.

3.2 Montage auf der Baustelle

Für den Ersatz der Brückenplatte wurde das Wochenende vom 11./12. November 2017 bereits drei Jahre vor Baubeginn festgelegt. Um den Bahnbetrieb möglichst wenig einzuschränken, sah das Einbaukonzept vor, ein Gleis während 24 Stunden komplett zu sperren, um sämtliche Rückbau- und Montagearbeiten auszuführen. So konnte immer ein Gleis in Betrieb gehalten werden. Unmittelbar nach Abschluss der Arbeiten für das erste Gleis wurde die neue UHFB-Brückenplatte in Betrieb genommen, um sofort mit den analogen Arbeiten für das zweite Gleis beginnen zu können. Zur Sicherung des benachbarten Gleises wurde jeweils eine provisorische Schotterhalterung mit Walzprofilen eingebaut.

Während der Gleissperre waren neben den Baumeisterarbeiten auch die bahntechnischen Arbeiten mit dem Gleisbau auszuführen. So war ein Gleisjoch aus- bzw. wieder einzubauen und zu verlaschen und die Fahrbahn in den betriebstauglichen Zustand zu stopfen.

Die Baumeisterarbeiten umfassten den Rückbau der Fahrbahnplatte, das Herrichten des Auflagers auf dem bestehenden Widerlager, das Versetzen der Fahrbahn-



Bild 8 Versetzen der vorfabrizierten UHPFB-Rippenplatte und des Randträgers (bei Zugsdurchfahrt auf dem benachbarten Gleis) auf die Widerlager
Mounting of the precast UHPFRC ribbed plate and edge girder (with a passing train on the neighboring track) on the abutments

platte und des Randträgers, die Hinterfüllungs- und Schütтарbeiten für den Fahrbahnbau sowie das Einschottern. Um das vorgegebene Zeitfenster zu entlasten, wurden diverse Vorbereitungen getroffen. Die Widerlager aus Stampfbeton wurden vorgängig auf die festgesetzte Höhe zugeschnitten und die bestehende Betonplatte mit Walzprofilen wurde vorgängig zum Ausbau zwischen den beiden Gleisen in Längsrichtung in zwei Teile gefräst.

Einen Hauptbestandteil des Einbaukonzepts bildete der Einsatz der Hebegeräte. Aufgrund der örtlichen Gegebenheiten wurden je ein Auto- und Schienenkran eingesetzt, da die vorhandenen Fahr- und Übertragungsleitungen ein rein straßenseitiges Einheben der UHPFB-Fertigteile verunmöglichte. Mit dem Autokran wurden die beiden Plattenelemente möglichst nahe an der Bahntrasse platziert, damit der Schienenkran nur leicht ausschwenken musste und somit das Lichttraumprofil des Nebengleises nicht tangierte. Der Schienenkran des Typs Kirow KRC800 transportierte danach das Plattenelement auf dem Gleis zur Einbaustelle und setzte es zentimetergenau auf die Widerlager ab (Bild 8). Das relativ leichtgewichtige UHPFB-Plattenelement begünstigte diesen Vorgang. Anschließend wurde der Randträger mit dem Straßenkran versetzt.

Der detaillierte Einbauplan mit einem im Halbstundentakt vorgegebenen Ablaufplan der Arbeitsschritte ermöglichte unter Einhaltung des Sicherheitsdispositivs eine effiziente Koordination und Zusammenarbeit zwischen der Baufirma und den Fachdiensten der Bahn.

3.3 Inbetriebnahme

Die Inbetriebnahme der neuen UHPFB-Brückenplatten erfolgte unmittelbar nach Abschluss der jeweiligen Arbeiten pro Gleis. Während der ersten fünf Tage wurde die Geschwindigkeit der Züge auf 80 km/h und danach während der nächsten fünf Tage auf 120 km/h begrenzt. Nach zehn Tagen wurde die maximal zulässige Streckengeschwindigkeit von 160 km/h freigegeben.

3.4 Baukosten

Die Gesamtbaukosten der Baumeisterarbeiten, d. h. ohne bahneigene Kosten und Planungsleistungen, betragen rund 820.000 Schweizer Franken (umgerechnet ca. 722.000 Euro) und liegen im gleichen Kostenrahmen wie ein herkömmliches Projekt in Stahlbetonbauweise in der Schweiz. Dabei entfiel der Hauptanteil der Kosten von je 20% auf die Vorbereitungsarbeiten auf der Baustelle sowie den Neubau der Bankethalterung. Die Instandsetzung und Erneuerung der Auflagerbank und Mauern der beiden Widerlager beanspruchte etwa 15% der Kosten. Die Rückbauarbeiten und der Einbau der UHPFB-Fertigteile betragen ebenfalls etwa 15% der Kosten.

Die Herstellung der UHPFB-Fertigteile beanspruchte 15% der Gesamtkosten, wobei die verbauten 24 m³ UHPFB etwa die Hälfte ausmachten. Die Baustoffkosten für den UHPFB machen somit einen unwesentlichen Anteil an den gesamten Projektkosten aus.

Mit einer dynamischen Wirtschaftlichkeitsrechnung wurde der Life-Cycle-Costing (LCC) Vergleich mit einer Brückenplatte aus Stahlbeton durchgeführt. Aufgrund geringerer Unterhaltskosten wies die Variante aus UHPFB-Brückenplatten geringere Kosten im Lebenszyklus aus.

4 Monitoring des Tragverhaltens

Nach Inbetriebnahme der Brücke wurde eine kontinuierliche messtechnische Überwachung des Tragverhaltens der UHPFB-Brückenplatte in Betrieb genommen. Dieses „Monitoring“ wurde durch die ETH Zürich (Lehrstuhl Prof. Dr. ELENI CHATZI, Institut für Baustatik und Konstruktion) in Absprache mit der Bauherrschaft und dem Projektverfasser ausgearbeitet und installiert. Das umfangreiche Messprogramm des Monitorings beinhaltet unter anderem die Messung folgender Werte (Bild 9):

- Durchbiegung in Spannweitenmitte und Viertelpunkten mit je einem Laser-Distometer unter jedem Gleis



Bild 9 Struktur der UHFB-Rippenplatte mit Sensoren und eingelegtem Referenzbalken für die Durchbiegungsmessung
Texture of the ribbed slab in UHPFRC showing some sensors and the added reference beam for the deflection measurement

- 22 Dehnmessstreifen, an den maßgebenden Stellen auf die Oberfläche der UHFB-Tragwerksteile geklebt
- zwölf Beschleunigungssensoren zur Messung von Schwingungen und Beschleunigungen

Ein Großteil der Sensoren wurde nach der Herstellung der beiden UHFB-Plattenelemente im Elementwerk montiert. Nach dem Einbau der Brückenplatten wurden die Distometer eingebaut. Für den Betrieb des Monitorings wurden ein Stromanschluss und eine Verteilkabine erstellt. Zwei Wochen nach Inbetriebnahme wurde eine Belastungsprobe mit einer Lokomotive im Stillstand und bei Überfahrten mit definierten Geschwindigkeiten durchgeführt. Dadurch konnte die Messeinrichtung mit einer genau bekannten Bahnlast überprüft und kalibriert werden.

Das Tragverhalten der Brückenplatte wird mit dem Monitoring über zwei Jahre detailliert verfolgt. Danach wird die Brücke gemäß den üblichen Richtlinien der SBB überwacht. Nach einem Messzeitraum von mittlerweile einem Jahr konnten folgende Erkenntnisse aus den Messungen gewonnen werden [9]:

- Die häufigsten gemessenen Durchbiegungen der UHFB-Rippenplatte bei Zugüberfahrt betragen 0,40–0,65 mm mit vereinzelt gemessenen maximalen Durchbiegungen von 1,0 mm. Der Maximalwert der gemessenen Dehnung ist um den Faktor 4,5 kleiner als die errechnete Durchbiegung am vereinfachten Tragwerksmodell und mit Annahme von Normlasten.

- Die größten gemessenen Dehnungen des UHFB am Rippenuntergurt in Feldmitte betragen $20 \mu\text{m}$. Dies entspricht bei einem angenommenen Elastizitätsmodul von 50 GPa einer Zugspannung von 1 MPa. Die effektive elastische Grenzzugspannung des UHFB liegt bei 8 MPa, womit das Niveau der Beanspruchung des UHFB im Gebrauchszustand sehr gering ist.
- Die ausgewerteten maximalen Beschleunigungen im Frequenzbereich von 0 bis 80 Hz ergeben einzelne Peaks bei $2,5 \text{ m/s}^2$, mehrheitlich sind die maximalen Beschleunigungen kleiner $1,5 \text{ m/s}^2$. Die Werte sind deutlich geringer als die berechneten Beschleunigungen und der nach Norm EN 1990 zulässige Wert von $3,50 \text{ m/s}^2$.

Aus den bisher erfassten Messwerten kann hergeleitet werden, dass die in Wirklichkeit auftretenden Beanspruchungen im UHFB-Tragwerk um ein Mehrfaches kleiner sind als die Grenzzustände der rechnerisch nachgewiesenen Bemessungssituationen.

Diese erwartete, sehr große Differenz zwischen den gemäß den Normen verlangten rechnerischen Werten und den effektiv auftretenden Werten ist zum einen auf die ingenieurmäßige Modellbildung und die damit verbundenen Vereinfachungen sowie auf das Normlastmodell für Bahnlasten zurückzuführen. Tatsächlich zeigt eine Plausibilitätsprüfung am Beispiel der hier diskutierten Brücke, dass das mit dem Normlastmodell berechnete maximale Biegemoment (charakteristischer Wert) mehr als 4,5 Mal größer ist als dasjenige eines Fahrzeugs mit einer Doppelachse der auf dieser Bahnlinie zugelassenen maximalen Achslast von 225 kN. Zudem gilt es zu beachten, dass bei kurzen Spannweiten die mittragende Wirkung des Gleis- und Schotterkörpers beträchtlich ist und im vorliegenden Fall etwa 10% beträgt [10].

Das seit beinahe einem halben Jahrhundert verwendete Normlastmodell für Bahnlasten, d.h. das 1971 eingeführte Lastmodell UIC71, erweist sich bei dieser Brücke als konservativ und das Tragwerk wirkt beim Vergleich der berechneten mit den gemessenen Werten als überdimensioniert. Das Normlastmodell UIC71 stellt einen europäischen Standard dar. Es ist definiert als Einhüllende für eine große Zahl an Betriebszügen für einfache Balken mit verschiedenen Stützweiten, wobei ein gerade bei kleinen Spannweiten übermäßig hoher dynamischer Beiwert beaufschlagt wird, der in Wirklichkeit gar nicht auftritt. In Abhängigkeit von der Stützweite und Betrachtung der individuellen Belastung können so bei Bemessung mit dem Normlastmodell UIC71 größere Querschnittsabmessungen resultieren, wobei bei Neubauten die Mehrkosten bedingt durch größere Querschnittsabmessungen im Vergleich zu den Gesamtkosten des Bauwerks in der Regel gering sind.

Demgegenüber ist bei der Überprüfung und Nachrechnung von bestehenden Brücken neben der Optimierung von Tragwiderstandsmodellen zur Berechnung von Tragwiderständen auch der Ermittlung von realen Last- und Spannungsverteilungen eine sehr hohe Bedeutung beizumessen.

5 Folgerungen und Ausblick

Rund 120 Jahre nach dem Bau der ersten Bahnbrücke aus Eisenbeton wurde für den Ersatzneubau einer doppelspurigen Bahnbrücke ein Tragwerk aus bewehrtem UHFB gebaut und in Betrieb genommen (Bild 10). Die bewehrte UHFB-Konstruktion bestehend aus zwei Rippenplatten und Randträgern wurde unter Anwendung der gültigen Normen ohne besondere Schwierigkeiten aufgrund von detaillierten Untersuchungen zuverlässig bemessen und anhand von Vorversuchen nachgewiesen. Die Herstellung der UHFB-Tragwerksteile erfolgte in Fertigteilmontage, was einen schnellen Einbau der neuen Brückenplatte ermöglichte. Das seit der Inbetriebnahme laufende Monitoring des Tragverhaltens des UHFB-Tragwerks bestätigt die erwarteten geringen Werte von Verformungen, Dehnungen und dynamischem Verhalten.

Das Potenzial für zukünftige Anwendungen von UHFB im Ingenieurbau der Bahninfrastruktur liegt beim Einsatz von standardisierten vorgefertigten Brückenplatten, Schottertrögen auf Natursteinmauerwerks- und Stahlbrücken, Abdichtungen von Brückenplatten sowie vorgefertigten



Bild 10 Ansicht der SU Unterwalden (Juni 2018)
View the Road Underpass Unterwalden (June 2018)

zierten Bauteilen wie Randbalken, Schwellen und Teilen der festen Fahrbahn. Ein weiteres Anwendungspotenzial liegt in vorgespannten Brückentragwerken mittlerer und großer Spannweiten.

Literatur

- [1] *Schweizer Bahnbrücken* (Architektur- und Technikgeschichte der Eisenbahnen in der Schweiz, Band 5). Verlag Scheidegger & Spiess, 2013.
- [2] BRÜHWILER, E.: *Conceptual design and construction of lightweight R-UHPFRC bridges*. Proceedings, IABSE Symposium Vancouver Canada, Sept. 21–23, 2017.
- [3] Norm SIA 260 *Grundlagen der Projektierung von Tragwerken*. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein SIA, Zürich, 2013.
- [4] Norm SIA 261 *Einwirkungen auf Tragwerke*. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein SIA, Zürich, 2014.
- [5] Merkblatt SIA 2052 *UHFB – Baustoffe, Bemessung, Ausführung*. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein SIA, Zürich, 2016, 44 Seiten.
- [6] MAKITA, T.; BRÜHWILER, E.: *Tensile fatigue behaviour of Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete combined with steel rebars (R-UHPFRC)*. International Journal of Fatigue 59 (2014), pp. 145–152.
- [7] BORKOWSKI, G.; THOMA, K.; BRÜHWILER, E.; RUPP, C.: *Experimentelle Validierung einer Plattenbalken-Bahnbrücke aus bewehrtem UHFB*. Beton- und Stahlbetonbau 112 (2017), Heft 6, S. 320–328.
- [8] PAN, R.; BRÜHWILER, E.; SHEN, X.: *Nonlinear numerical analysis of R-UHPFRC railway Π -beams*. Proceedings, 1st International Conference on UHPC Materials and Structures (UHPC2016-China), Changsha, China October 27–30, 2016.
- [9] HARMANCI, Y. E.; DERTIMANIS, V.; CHATZI, E.: *Monitoring SU Unterwalden*, Technical Report, ETH Zürich, 26.10.2018. (nicht veröffentlicht).
- [10] HERWIG, A.: *Reinforced concrete bridges under increased railway traffic loads – Fatigue behavior and safety measures*. Doctoral Thesis No 4010, Swiss Federal Institute of Technology (EPFL), Lausanne, Switzerland, 2008.

Autoren



Prof. Dr. Dipl.-Ing. ETH Eugen Brühwiler
EPFL – ETH Lausanne
ENAC-IIC-MCS, Station 18
1015 Lausanne, Schweiz
eugen.bruehwiler@epfl.ch



Dipl.-Ing. Herbert Friedl
SBB AG, Infrastruktur
Ingenieurbau und Wasser
Leitung Technologisches Anlagenmanagement
Hilfikerstrasse 3
3000 Bern, Schweiz
herbert.friedl@sbb.ch



Dipl. Bauing. FH/SIA/STV Christoph Rupp
Schweizerische Bundesbahnen
Bahnhofstrasse 12
4600 Olten, Schweiz
christoph.rupp@sbb.ch



Dipl. Bauing. ETH/SIA Hanspeter Escher
KOST+PARTNER AG Ingenieure und Planer
Hirschengraben 33a
6000 Luzern 7, Schweiz
hanspeter.escher@kost-partner.ch