

Modulbauweisen im Verbundbrückenbau

Rückblick und aktuelle Tendenzen beim Bau von Brücken mit kleinen und mittleren Spannweiten

Thomas Lechner
Victor Schmitt
Oliver Fischer
Johannes Kempf

Modulbauweisen im Verbundbrückenbau

Rückblick und aktuelle Tendenzen beim Bau von Brücken mit kleinen und mittleren Spannweiten

Die modulare Konstruktion von Brückenbauwerken stellt in vielen Ländern mittlerweile den anerkannten Stand der Technik dar und wird dort stetig eingesetzt und weiterentwickelt. Insbesondere im europäischen Ausland, in den USA und im asiatischen Raum wird bereits eine Vielzahl der neuen Brücken in Segmentbauweise aus Stahlbeton- oder Spannbetonfertigteilen errichtet. Auch modulare Bauweisen in Stahlverbund kommen zum Einsatz. Die Vorteile von Modulbauweisen im Brückenbau liegen neben der qualitativ hochwertigen Fertigung der Einzelteile im Werk insbesondere in der deutlich verkürzten Bauzeit. Vor allem mit Blick auf das hoch ausgelastete Straßennetz werden auch in Deutschland (insbesondere für Ersatzneubauten) Entwürfe benötigt, die in kurzer Bauzeit bei minimaler Beeinträchtigung der Umwelt und des Verkehrs realisiert werden können. Im vorliegenden Beitrag werden verschiedene Modulbauweisen für den Verbundbrückenbau vorgestellt. Es wird zunächst ein kurzer Rückblick gegeben, bevor auf aktuelle Tendenzen und neue Entwicklungen eingegangen wird.

Stichworte Modulbau; Verbundbau; VFT; VSM; VTR; VTT; Segmentbrücken; Stahlverbundbrücke

Modular construction methods in composite bridge construction – review and current developments for bridges with small and medium spans

The modular construction of bridge structures is now the recognized state of the art in many countries and is used there on a regular basis. Especially in other European countries and the USA, a large number of new bridges are already being built in segmented construction from reinforced or pre-stressed concrete elements. Modular steel-composite construction methods are also used. The advantages of modular bridge construction are the high-quality production of the individual components in the factory and, in particular, the significantly reduced construction time. Especially in view of the highly utilized road network, designs are also needed in Germany that can be realized in a short construction time with minimal impact on the environment and traffic. In this paper different modular designs for composite bridge construction will be presented. First a short review is given before current trends and new developments are discussed.

Keywords modular construction; composite construction; VFT; VSM; VTR; VTT; segmental bridge; steel composite bridge

1 Einleitung

1.1 Hintergrund

Aufgrund der Altersstruktur der deutschen Brücken werden derzeit und in den kommenden Jahren zahlreiche Brückenbauwerke ersetzt werden müssen. Hierzu zählen neben den Brücken der Bundesfernstraßen, bei denen die Defizite gut dokumentiert sind [1, 2], auch zahlreiche kleinere Überführungsbauwerke aus den 1960er- und 1970er-Jahren. Gerade für den Ersatz von Überführungsbauwerken und Bauwerken mit kleinen und mittleren Spannweiten bieten sich modulare Bauweisen an, wie ein Blick ins Ausland zeigt.

In den Niederlanden wird bspw. eine ganze Reihe von Überführungsbauwerken (inklusive der Unterbauten) vollständig in modularer Bauweise errichtet. In Irland werden ähnliche Bauweisen bevorzugt [3]. Ein Beispiel für die Herstellung großer Talbrücken aus Spannbeton im Match-Cast-Verfahren liegt mit den Bauwerken entlang der Eisenbahn-Neubaustrecke LGV SEA Tours-Bordeaux in Frankreich vor [4]. Auch in Stahlverbundbauweise werden dort Talbrücken über mehrere Felder als Verbundkonstruktionen mit vorgefertigten Fahrbahnplatten erstellt [5]. In den USA gibt es die innovative Entwick-

lung, dass vermehrt Brücken errichtet werden, bei denen die Übergreifungsstöße der Bewehrung aus Vollplatten für Stahlbeton- oder Verbundbrücken durch die Verwendung von ultrahochfestem Beton in den Vergusstaschen auf weniger als 20 cm reduziert werden. Diese Entwicklung wird durch die Federal Highway Administration (FHWA), die Behörde für Fernverkehrsstraßen, mit einer eigenen Veröffentlichung zu diesem Thema explizit unterstützt [6]. Es zeigt sich also, dass im Ausland eine Vielzahl von unterschiedlichen modularen Bauweisen existiert, diese von den Behörden gefördert werden und daher auch einen entsprechend hohen Marktanteil besitzen.

1.2 Vorteile der Modulbauweisen

Der wichtigste Vorteil der modularen Bauweisen ist die gegenüber konventionellen Bauweisen deutlich verkürzte Bauzeit. Gerade bei Ersatzneubauten von Überführungsbauwerken sollte die Herstellung der neuen Brücke ohne wesentliche Beeinträchtigung des unter der Brücke fließenden Verkehrs erfolgen. Hierdurch werden Staus und Umfahrungen reduziert und der hieraus resultierende unnötige CO₂-Ausstoß vermieden. Es ergeben sich in der Folge Kosteneinsparungen beim Bau selbst, bei evtl. Verkehrsumlegungen und darüber hinaus.

Ein weiterer Vorteil der Modulbauweisen ist, dass die Umwelteingriffe auf der Baustelle durch das reine Zusammenfügen von vorgefertigten Brückensegmenten minimiert werden. Die modularen Segmente können im Werk serienmäßig optimiert, witterungsunabhängig mit hoher Geschwindigkeit und entsprechender Qualität gefertigt werden. Die so gefertigten Betonelemente besitzen dann sehr dichte Oberflächen, die einer konstanten Qualitätssicherung unterliegen, wodurch sich extrem dauerhafte Konstruktionen ergeben, bei denen die Kosten für die Unterhaltung sowie die Lebenszykluskosten insgesamt geringer ausfallen als bei Ort betonbauwerken. Wichtig ist in diesem Zusammenhang, dass auch für die Verbindung der einzelnen Module eine statisch und konstruktiv hochwertige Lösung gewählt wird. Die Erfahrungen im Ausland [6] und die Pilotprojekte in Deutschland [7, 8] zeigen jedoch, dass sich diese vermeintlichen Schwachpunkte sicher und dauerhaft lösen lassen. Modulare Tragwerke, ihre Verbindungen und Herstellung sind auch Thema eines aktuellen DFG-Forschungsvorhabens, dessen Ziel ein schnelleres Bauen mit intelligenter Vorfertigung ist [9].

Bei Ersatzneubauten gibt es häufig die Forderung, dass das neue Bauwerk trotz deutlich gesteigerter Verkehrsbelastung mit der Bauhöhe der bestehenden Brücke realisierbar sein soll. Ansonsten resultieren häufig Kosten und Umweltbeeinflussungen außerhalb des Brückenbauwerks infolge des Anhebens von Zufahrtsstraßen oder Rampen, die vermieden werden sollten. Gerade für solche Anwendungsfälle bietet sich der Verbundbau mit geringem Eigengewicht und hoher Tragfähigkeit an. Modulbauweisen im Verbundbau besitzen gegenüber den Bauweisen aus Stahl- und Spannbeton in der Herstellung, beim Transport und der Montage immer Gewichtsvorteile. In diesem Beitrag wird daher zunächst die Entwicklung des modularen Verbundbrückenbaus beschrieben, bevor auf aktuelle Bauweisen und in der Entwicklung befindliche Systeme eingegangen wird.

2 Entwicklung des modularen Verbundbrückenbaus

Der Überbau einer in Modulbauweise erstellten Verbundbrücke setzt sich aus den Modulen Fahrbahnplatte und Stahllängsträger zusammen. Die Fahrbahnplatte besteht aus vorgefertigten Stahl- bzw. Spannbetonsegmenten. Der Verbund zwischen den beiden Modulen wird mithilfe von Verbundmitteln hergestellt. Weltweit wurden in der Vergangenheit verschiedene Techniken zum Fügen der Segmente entwickelt, auf die im Folgenden ein besonderes Augenmerk gelegt wird.

2.1 Bauweisen mit besonderen Verbundmitteln

Bereits in den 1960er-Jahren realisierten Ingenieure der DDR im Zuge der Errichtung der Wirtschaftswegbrücke über die Hohensaaten-Friedrichstaler Wasserstraße (Bild 1) die schubfeste Verbindung zwischen vorgefertigten Fahrbahnplattenelementen und den Stahlträgern über einen



Bild 1 Verlegen der Betonfertigteile auf der Wirtschaftswegbrücke über die Hohensaaten-Friedrichstaler Wasserstraße [10]
Precast concrete elements on the bridge over the Hohensaaten-Friedrichstaler waterway

Reibverbund. Die Betonfertigteile der Fahrbahnplatte wurden hierfür mithilfe von HV-Schrauben mit den Stahlträgern verspannt. Nachträglich in den Stahlobergurt und die Fahrbahnplatte gebohrte Löcher dienten dabei zur Befestigung der HV-Schrauben (Bild 2a). Diese Verbundtechnik stellte sich aufgrund des niedrigen Verbundgrads jedoch als problematisch heraus. Zudem erforderte das Vor- und Nachspannen der HV-Schrauben, das u. a. wegen des Kriechens erforderlich wurde, einen hohen Zeitaufwand. Daher wurde von einer Umsetzung bei weiteren Bauwerken abgesehen [10]. Stattdessen konnte mit der Entwicklung eines typisierten Hohlübels ein deutlich besserer Verbund erreicht werden. Die großformatigen Stahldübel, die in jeweils vier Aussparungen je Fertigteile eingesetzt und mit dem Stahlobergurt verschweißt wurden, sind in Bild 2b zu erkennen. Der Verbund zwischen Stahlträger und Betonfertigteileplatte entstand durch den Verguss der Aussparungen mit schwindarmem Mörtel. Diese Verbundtechnik wurde bei der Brücke über die Mulde bei Grimma, bei der Vorlandbrücke über die Elbe bei Wittenberge sowie bei einer Reihe von Überführungsbauwerken verwendet [10].

In den USA wurde u. a. eine Lösung mit auf den Stahllängsträgern aufgeschweißten U-Profilen als Verbundmittel vorgeschlagen (Bild 2c). In den Stahlbeton-Fertigteileplatten wurden im Bereich der U-Profile rechteckige Aussparungen angeordnet, die vor Ort mit Epoxidharz-beton vergossen wurden [11].

2.2 Bauweisen mit Kopfbolzendübeln

Weltweit haben sich mittlerweile Kopfbolzendübel als Verbundmittel durchgesetzt, weshalb diese auch im modularen Verbundbrückenbau das meistverwendete Verbundmittel darstellen. Die nachfolgend vorgestellten Verbundvarianten unterscheiden sich vor allem in der Anordnung der Kopfbolzendübel auf den Stahllängsträgern. Eine im Ausland oft angewandte Bauweise wurde bereits in den 1960er- und 1970er-Jahren bei Brückenbauwerken in der Schweiz umgesetzt [7]. Das Grundprinzip dieser Bauweise besteht darin, dass Kopfbolzendübel in Gruppen auf die Stahllängsträger aufgeschweißt werden. In den Segmenten befinden sich als Gegenstück rechteckige

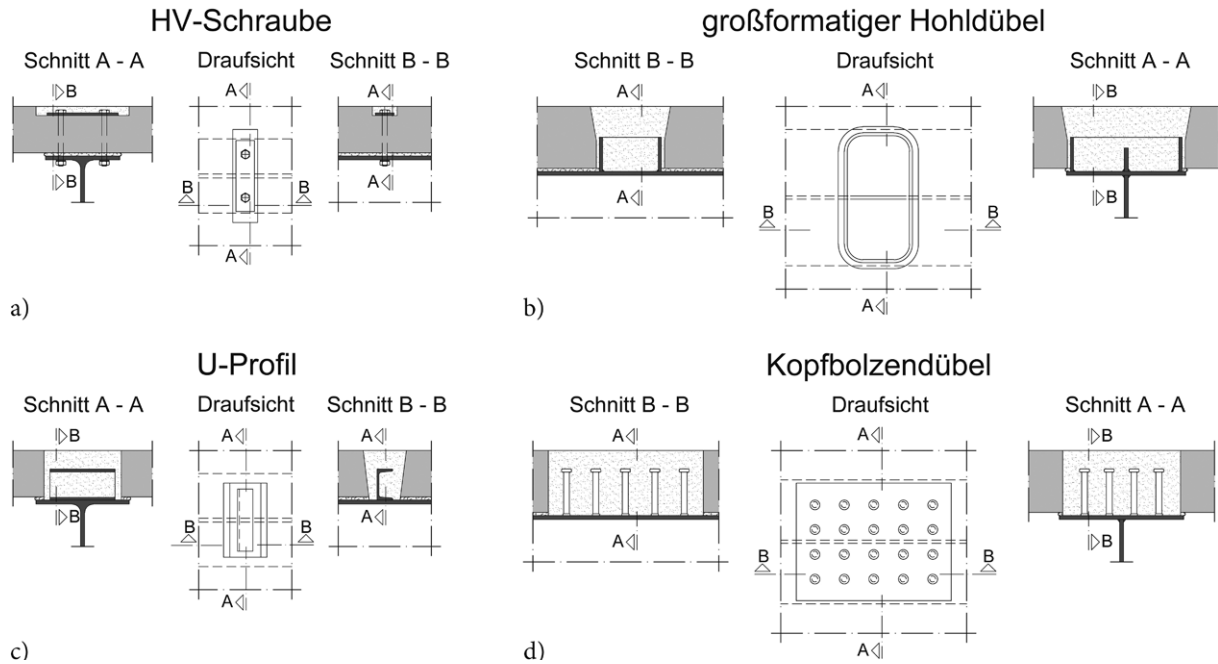


Bild 2 Verbundmittel für modulare Verbundbrücken: a) HV-Schrauben, b) großformatige Hohlzübel, c) U-Profile und d) Kopfbolzendübel
 Connection elements for modular composite bridges: a) HT-screws, b) large hollow-dowels, c) u-profiles and d) headed studs

Öffnungen. Diese sind entweder bereits werkseitig bewehrt oder werden auf der Baustelle nach dem Verlegen der Fertigteile mit Bewehrung ergänzt. Der Verbund zwischen den Segmenten und den Stahllängsträgern wird durch das Vergießen der rechteckigen Öffnungen hergestellt (Bild 2d). Auch in den USA [12], in England [13], Frankreich [5], Japan [14] und Südkorea [15] fand diese Bauweise Anwendung. In Deutschland kam diese Bauweise 2018 beim Ersatzneubau der Brücke Hammacher Straße bei Hagen zum Einsatz [16].

Eine weitere Möglichkeit, den Verbund zwischen den Betonsegmenten und den Stahlträgern herzustellen, wurde in Frankreich bei dem Überführungsbauwerk PS 13 über die A 85 im Département Loire-et-Cher realisiert [7]. Für den Verbund wurden in regelmäßigen Abständen runde Öffnungen mit einem Durchmesser von 80 mm in den Fahrbahnsegmenten angeordnet. Erst nach dem Verlegen der Fahrbahnsegmente wurden durch diese Öffnungen einzelne Kopfbolzendübel von oben auf die Stahlhauptträger aufgeschweißt (Bild 3). Im Anschluss erfolgte die Herstellung des Verbunds durch den Verguss der Öffnungen mit selbstverdichtendem Beton [5, 7].

Bei einem in Schweden verwendeten Verbundverfahren werden kontinuierlich verlaufende Reihen von Kopfbolzendübeln auf die Stahlträgerobergurte aufgeschweißt. In den Betonsegmenten sind für die Kopfbolzendübel U-förmige Kanäle ausgespart (Bild 4). Die Kanäle in den Segmenten und die Stahlträgerobergurte bilden zusammen die Schalung für den Vergussmörtel. Für das Einbringen des Vergussmörtels in die Verbundfuge sind pro Segment und Kanal zwei Bohrungen über die Querschnittshöhe des Segments vorgesehen. Diese Methodik wurde 2000 bei der Brücke über den Rokån und 2002 bei der Eisenbahnbrücke bei Norrfors angewandt [17].



Bild 3 Aufschweißen der Kopfbolzendübel durch runde Öffnungen in den Fahrbahnplattensegmenten einer modularen Verbundbrücke in Frankreich [5]
 Welding of headed studs through round openings in the segments of a modular composite bridge in France



Bild 4 Geschlossene Verbundfuge in den eingehobenen Segmenten [17]
 Closed composite joint in the precast segments

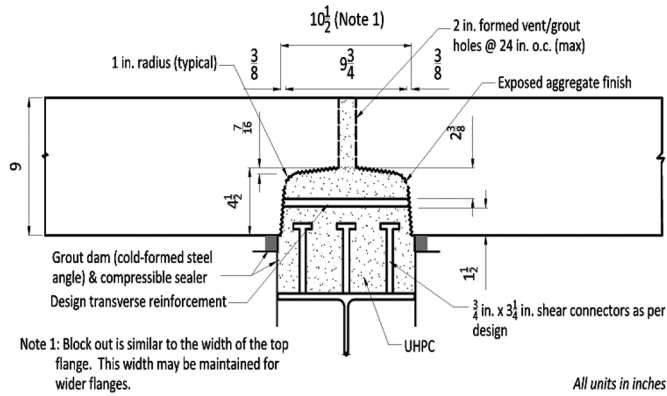


Bild 5 Geschlossene Verbundfuge mit UHPC-Verguss [6]
Closed composite joint with UHPC

Ganz analog wird in den USA der Bau von modularen Verbundbrücken unter Berücksichtigung des Fugenvergusses mit UHPC durch die FHWA unterstützt (Bild 5) [6].

In Finnland wurde beim Bau der Brücke über den Laisentianjoki ein ähnliches Verfahren erprobt, das jedoch statt einer verschlossenen eine nach oben offene Verbundfuge vorsieht. Aufgrund der durchgehenden Trennung des Querschnitts bildet die Verbundfuge beim Einheben der Fertigteile eine empfindliche Schwachstelle. Um ein Versagen beim Einheben zu vermeiden, mussten die Segmentteile an diesen Stellen mit Stahleinbauteilen verstärkt werden. Wie auch bei den anderen Verfahren, wurde der Verbund im Anschluss an das Einheben durch den Verguss der Verbundfuge hergestellt [18, 19].

Derzeit läuft auch in Zusammenarbeit der Lehrstühle für Metallbau und Massivbau der Technischen Universität München ein anwendungsorientiertes Forschungsvorhaben mit dem Ziel, die Stahlträger verzinkter Verbundbrücken durch UHPC-Verguss dauerhaft biegesteif zu längeren Trägereinheiten zu verbinden [20].

2.3 Segmentbrücken ohne Verbund

2014 wurde durch Max Bögl in Zusammenarbeit mit dem Büro SSF Ingenieure AG (SSF) ein neuartiges Konstruktionsprinzip entwickelt, das die Trennung der Tragstruktur in ein Längs- und ein Quertragsystem vorsah. Die

Umsetzung erfolgte erstmals bei der Pilotbrücke Greißelbach (Bild 6). Aus der Darstellung ist zu erkennen, dass auf einen Verbund zwischen der Fahrbahnplatte und dem Stahlverbundträger verzichtet wurde. Ziel der Konzeption war es, bei kurzer Bauzeit einen dauerhaften und anpassungsfähigen Entwurf sowie hohe Bauqualität zu erhalten. Durch den Verzicht auf einen Schubverbund zwischen Haupttragwerk und den quer spannenden Segmenten können einzelne Segmente einfach ausgetauscht werden. Das Segment erhält eine Gleitbeschichtung, die gemeinsam mit einem Edelstahlblech am Haupttragwerk garantiert, dass die Reibzahl von 0,30 über die gesamte Lebensdauer wirkt [21]. Die Längsträger bilden hierbei sogenannte Verbundfertigteilträger (VFT-Träger), die 1998 von SSF in der Variante mit Halbfertigteilen und späterer Ortbetonergänzung entwickelt wurden [22]. Im Gegensatz zu üblichen VFT-Trägern wird der Betonobergurt bei der Segmentbauweise nicht mehr durch Ortbeton ergänzt, sondern schon vollständig im Werk aufgebracht, und dient neben der Funktion als Verbundplatte zur Auflagerung der quer spannenden, vorgespannten Fahrbahnsegmente. Der Betongurt ist dabei über Verbunddübeln [23] mit dem Stahlträger schubfest verbunden [21].

3 Verbundbrücken mit VTR-Modulbauweise

3.1 Motivation

Mehrfeldrige Stahlverbundbrücken mittlerer Stützweite bis etwa 100 m werden international zunehmend mit einem zweistegigen Plattenbalkenquerschnitt und einem Trägerrost ausgeführt, um Halbfertigteile als Schalung für die Ortbetonplatte oder Vollplatten auf den Rost auflegen zu können. Diese Bauweise erspart den Einsatz von Schalwagen für das Ergänzen der Ortbetonplatte und verkürzt die Bauzeit erheblich, da Stahlbetonplatten für die Fahrbahn in ortsfester Serienfertigung vorgefertigt und einfach verlegt werden können. In Deutschland ist die Bauweise mit Vollplatten, für die i. d. R. eine Zustimmung im Einzelfall erforderlich wird, von der Bahretalbrücke bekannt [8]. Halbfertigteile werden häufiger für aktuelle Projekte vorgesehen und wurden auch bereits bei vielen Brückenbauprojekten der jüngeren Vergangenheit verwendet (z. B. Talbrücke Heidingsfeld, Langenfelder Brücke usw. [24]). Diskussionspunkte bieten dabei

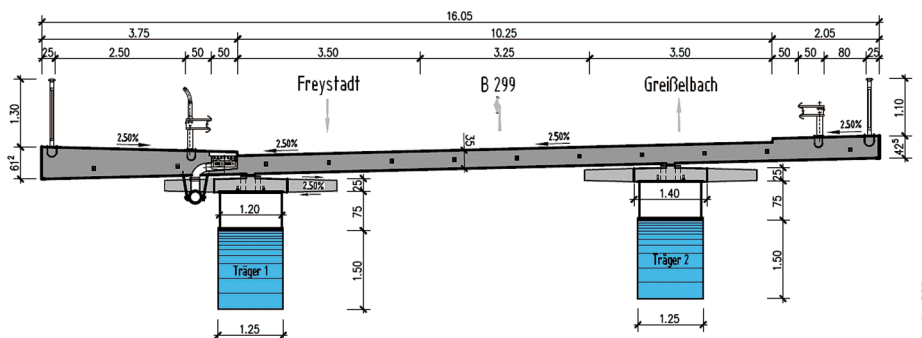
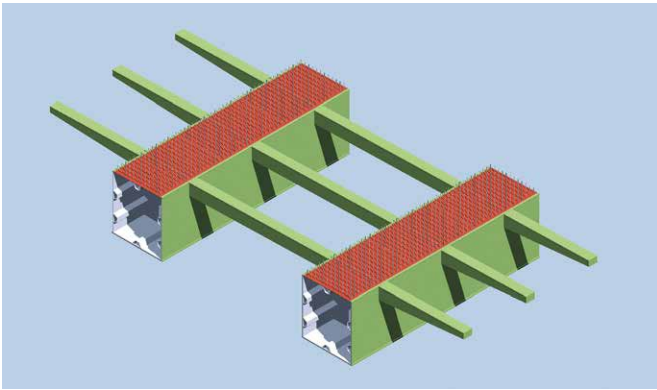


Bild 6 Querschnitt der Segmentbrücke Greißelbach
Cross-section of Greißelbach segment bridge



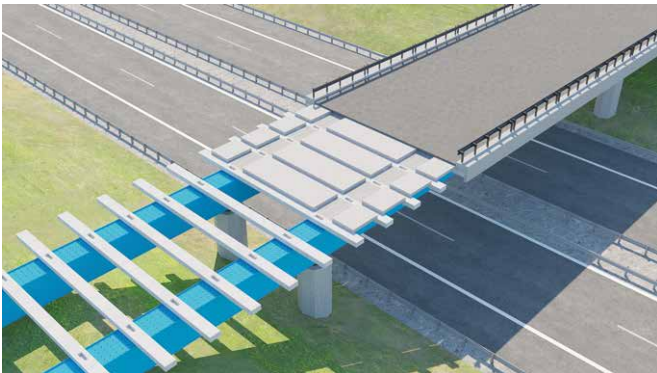
Quelle: SSF

Bild 7 Anschluss der Querträger an die Hauptträger auf der Baustelle
Connecting the cross beams to the main beams at the construction site



Quelle: Asociația Pro Infrastructură

Bild 9 A 10 Sebeș-Turda Muresviadukt km 40 + 200: Verlegen eines 55 m langen gekrümmten Stahllängsträgers
A 10 Sebeș-Turda Mures viaduct km 40 + 200: Transport of a 55 m long curved steel longitudinal beam



Quelle: SSF

Bild 8 Systematischer Aufbau der VTR-Bauweise
Systematic structure of the VTR construction method

u. a. immer wieder die Anschlüsse der Quer- bzw. Konsolträger an die Hauptlängsträger. Hierbei ist zum einen eine konstruktiv sorgfältige Ausbildung notwendig [25], zum anderen muss der Korrosionsschutz in diesem Bereich i. d. R. auf der Baustelle angebracht werden, wie die Prinzipdarstellung in Bild 7 zeigt. Die große Anzahl der Stöße auf der Baustelle verursacht hohe Kosten, erschwert die Qualitätssicherung und verlängert die Bauzeit.

Bei der von der SSF Ingenieure AG entwickelten Verbund-Träger-Rost- (VTR-)Bauweise wird diese Problematik aufgegriffen und durch eine konsequente Modularisierung ohne Baustellenschweißungen gelöst. Die Hauptelemente (Stahllängsträger, vorgefertigte Betonquerträger und Fahrbahnsegmente) sowie der systematische Aufbau der VTR-Bauweise können Bild 8 entnommen werden.

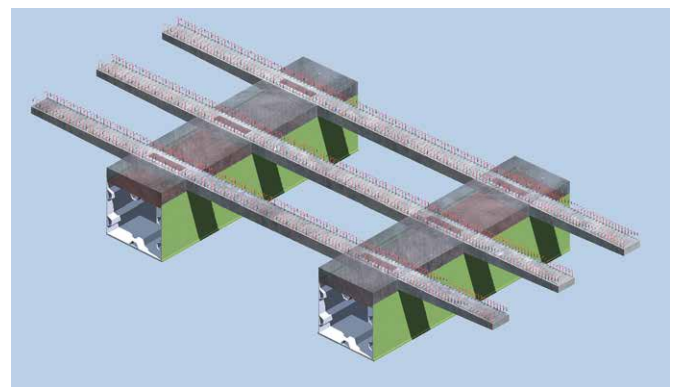
3.2 Prinzipieller Aufbau

Die Längsträger werden bei der VTR-Bauweise bevorzugt als luftdicht verschweißte Kästen mit Längen bis zu 40 m hergestellt (Bild 9). Breite und Höhe der Kästen können bei großen Stützweiten so ausgelegt werden, dass sie zur Prüfung bei Bedarf durchgehend begangen werden können. Wetterfester Stahl für die Längsträger kann eingesetzt werden, wenn die Umweltbedingungen geeignet sind und der Bauherr damit einverstanden ist.



Quelle: SSF

Bild 10 A 10 Sebeș-Turda Muresviadukt km 40 + 200: montierter Querträger
A 10 Sebeș-Turda Mures viaduct km 40 + 200: mounted cross girder



Quelle: SSF

Bild 11 Verbundträgerrost vor dem Auflegen der Fahrbahnsegmente
Composite girder grid before placing the roadway segments

Die Querträger werden vorgefertigt und in voller Länge auf die Längsträger aufgelegt (Bild 10). Der Verbund kann wie üblich mit Kopfbolzen und Ortbeton erfolgen. Auf diese Weise werden bereits die Lasten aus dem Eigengewicht der Fahrbahnplatte im Bauzustand über einen Verbundträgerrost abgetragen (Bild 11). Die Querträger können in Stahl oder Stahlbeton ausgeführt werden. In der Regel werden dichte Stahlbetonquerträger bevorzugt, da sie gegenüber den Stahlträgern wirtschaftliche Vorteile

in den Gestehungs- und Unterhaltskosten bieten. Die Ausführung erfolgt dann mit einem selbstverdichtendem Beton C50/60, um eine hohe Dichte des Gefüges zu erreichen, und wird i. d. R. für die Expositionsclassen XC4, XD3 und XF2 ausgelegt. Zur Vermeidung von Rissen durch Schwindbehinderung (z. B. beim Abheben der Träger aus der Schalung und beim Transport) werden die Träger im Spannbett teilvorgespannt.

Die Herstellung der Stahlbetonquerträger und der Fahrbahnplatte erfolgt üblicherweise in ortsfester Serienfertigung, die eine geometrische Genauigkeit, eine konstante Materialität, eine hohe Produktionsgeschwindigkeit und einen Einstieg in Fertigung durch Roboter ermöglicht. Für die Plattenmodule gelten die gleichen Qualitätsanforderungen wie bei den Querträgern. Teilungen der Platten werden grundsätzlich vermieden, sodass die Fahrbahnplatte in der Untersicht keine sichtbaren Fugen aufweist.

3.3 Transport und Montage

Der Transport aller Module kann mit der Bahn, dem Schiff oder mit einem Lkw über die Straße erfolgen. Die Längsträgermodule haben ein max. Gewicht von 100 t. Die Querträger wiegen max. 12 t, sodass zwei Träger gemeinsam mit einem Lkw transportiert werden können. Die Fahrbahnvollplatten haben einschließlich Bewehrungsüberständen max. Abmessungen von 2,6 m × 8 m und ein Gewicht unter 7 t, sodass drei Platten auf einem Lkw gestapelt angeliefert werden können. Es hat sich herausgestellt, dass der Transport und die Montage bei größeren Gewichten unwirtschaftlich werden.

Bei Kranmontage werden die Module der Stahllängsträger feldweise verlegt und zu Durchlaufträgern verschweißt. Auf dem Obergurt der Träger sind justierbare Auflagerpunkte für die Querträger vorgesehen, die zum Gradientenausgleich vor dem Verlegen der Querträger auf Sollhöhe gebracht werden. Die montierten Querträger werden durch einen Ortbetongurt mit den Längsträgern verbunden. Auf diese Weise entsteht der beschriebene Verbundträgerrost (Bilder 10–12), auf den die Halbfertigteile als Schalung für die Ortbetonplatte oder die Fahrbahnvollsegmente verlegt werden können. Die torsionssteifen Längsträger und der robuste Querträgerrost ermöglichen es, auf zusätzliche Stützquerträger in den Auflagerachsen zu verzichten. Alternativ zur beschriebenen Bauweise kann der Überbau eingeschoben werden. Dann wird auf einem Rüstplatz der Trägerrost mit Halbfertigteilplatten vorgefertigt und die Ortbetonplatte nach dem Einschub ergänzt.

3.4 Beispiele für aktuelle Bauwerke

Die ersten Brücken in VTR-Bauweise wurden im Jahr 2014 in Polen und Rumänien realisiert. Mit einer Gesamtlänge von 720 m (12 × 60 m) ist insbesondere das Muresviadukt bei Simeria (Rumänien) ein gutes Beispiel für die Leis-



Bild 12 A 10 Sebeş-Turda Muresviadukt km 40 + 200: Verlegen der Fahrbahnmodule auf den Trägerrost
A10 Sebeş-Turda Mures viaduct km 40 + 200: Mounting the roadway modules on the girder grid

Quelle: Asociația Pro Infrastructură

tungsfähigkeit dieser Bauweise. Bei diesen ersten Brücken in VTR-Modulbauweise wurde ein Querträgerraster von 4 m und ein Querträgerquerschnitt 1,0 m × 0,3 m gewählt. Hierbei wurden Vollplatten mit einer Stärke von 25 cm eingesetzt.

Aufgrund der Erfahrungen bei der Ausführung hat sich inzwischen ein kleineres Raster von 2,4 m und eine geringere Querträgerbreite von 60 cm durchgesetzt, da schmalere Fahrbahnsegmente wirtschaftlicher gefertigt und einfacher transportiert werden können (Bild 12). Infolge des reduzierten Querträgerabstands von 2,4 m kann die Plattenstärke der Vollplatte auf 20 cm reduziert werden. Halbfertigteile zur Ergänzung einer Ortbetonplatte werden mit einer Stärke von 10 cm ausgeführt. Die Ausführungsvariante mit den Vollbetonplatten kommt derzeit in Rumänien bei drei Brückenbauwerken im Zuge der A 10 von Sebeş nach Turda zur Anwendung.

Die Erfahrung der ausgeführten Bauwerke zeigt, dass ein 240 m langer und 15 m breiter Überbau mit einer Fläche von 3600 m² in 30 Arbeitstagen realisiert werden kann. Diese kurze Bauzeit kann durch den hohen Vorfertigungsgrad erreicht werden.

4 Entwicklung der Verbund-Segment-Modul-Bauweise

4.1 Allgemeines

Auf Basis der in Abschn. 2 beschriebenen bestehenden modularen Verbundbauweisen wurde von der SSF Ingenieure AG die VSM-Bauweise (Verbund-Segment-Modul-Bauweise) entwickelt. Diese besteht, wie die früheren Verbundbrücken auch, aus den Stahlhauptträgern in Brückenlängsrichtung, den Fahrbahnsegmenten und der Vergussfuge (Bild 13). Im Gegensatz zur Segmentbrücke der Bauweise Max Bögl (s. Bild 6) werden hierbei die Längs- und Quertragrichtung nicht getrennt, wodurch sich eine niedrigere Bauhöhe realisieren lässt. Die Mo-

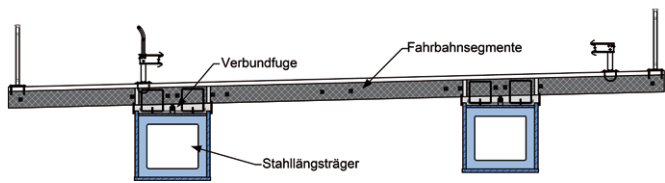


Bild 13 Typischer Querschnitt einer Brücke in VSM-Bauweise
Typical cross-section of a bridge in VSM construction method

dule, also die Stahllängsträger und die Fahrbahnsegmente, werden in Werken vorgefertigt und auf die Baustelle geliefert, vor Ort montiert und über die Vergussfuge miteinander verbunden. Die Fahrbahnsegmente tragen die Lasten in Querrichtung auf die Längsträger ab. In Längsrichtung wirken die Fahrbahnsegmente und die Stahlträger für den Endzustand als Verbundquerschnitt.

4.2 Aufbau

In Bild 13 ist beispielhaft der Querschnitt einer Brücke in VSM-Bauweise dargestellt. Die Segmente der Fahrbahnplatte besitzen Abmessungen von $2,66\text{ m} \times 13,8\text{ m}$ mit einer Dicke von 35 cm . Diese werden im Werk im Spannbett mit Spannstahlritzen im sofortigen Verbund in Segmentlängsrichtung vorgespannt. Für eine verbundlose Vorspannung der Segmente in Brückenlängsrichtung sind Hüllrohre in den Segmenten vorgesehen. Der Querschnitt eines Längsträgers, dessen Abmessungen der Beanspruchung angepasst werden können, ist ein geschlossener, luftdicht verschweißter Kasten. Die Stege des Kastens ragen über den Obergurt hinaus und dienen somit als seitliche Schalung für die dazwischenliegende Verbundfuge. Als Abschluss der seitlichen Schalung der Verbundfuge werden in die Segmente senkrechte Bleche einbetoniert. Diese Bleche überlappen sich mit den Stegen

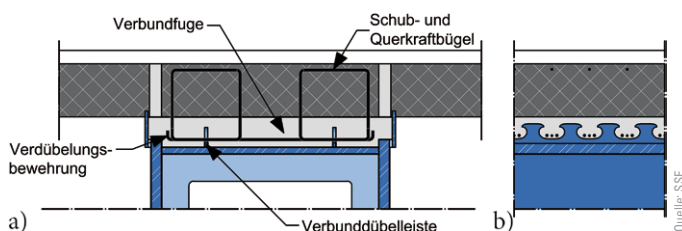


Bild 14 Verbundfuge der VSM-Bauweise im Querschnitt (a) und im Längsschnitt (b)
Composite joint of the VSM construction method; cross-section (a) and longitudinal section (b)

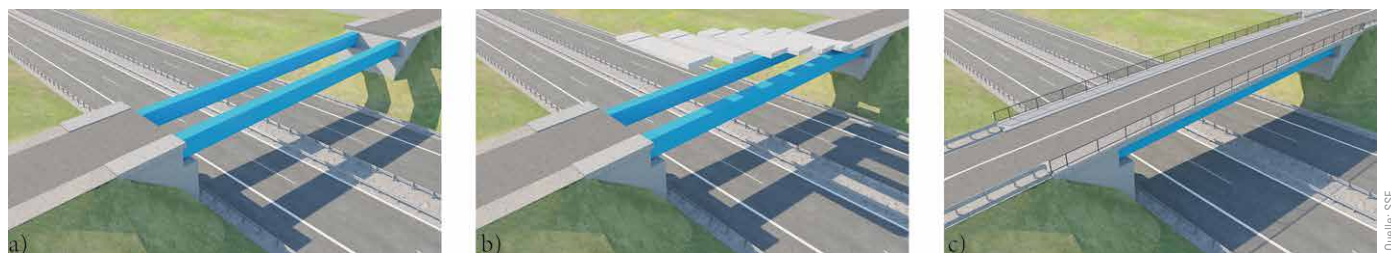


Bild 15 Schematischer Ablauf beim Bau einer Brücke in VSM-Bauweise: a) Einbau der Stahllängsträger, b) Verlegen der Fahrbahnsegmente und c) Fertigstellung des Überbaus
Schematic procedure for building a bridge in VSM construction method

(Bild 14a) und ermöglichen so einen Toleranzausgleich über eine zusätzliche Dichtung. Die obere und untere Einfassung der Verbundfuge bilden die Segmente und der Stahlträgerobergurt. Die Verbundfuge erstreckt sich kontinuierlich über die komplette Brückenlänge und wird auf der Baustelle mit selbstverdichtendem Beton vergossen. Zur Schubübertragung zwischen dem Stahlträger und dem Beton der Verbundfuge sind auf dem Stahlträgerobergurt aufgeschweißte Verbunddübeln oder Kopfholzendübel vorgesehen (Bild 14). Der Schubverbund zwischen der Verbundfuge und den Segmenten kann über Schubbewehrung realisiert werden.

4.3 Bauablauf

Vor Herstellung des Überbaus erfolgt zunächst die Errichtung der beiden Widerlager und der Pfeiler. Die Herstellung des Überbaus beginnt mit der Vorfertigung der Module im Werk. Nach Anlieferung der Stahlträger werden diese bei einer Einfeldbrücke auf die Widerlager aufgelegt (Bild 15a). Mithilfe eines Autokrans werden im nächsten Schritt die Spannbetonsegmente eingehoben (Bild 15b) und über Stellschrauben, die auf dem Stahlträgerobergurt befestigt sind, entsprechend der Gradienten ausgerichtet. Nach dem Verlegen werden Spannglieder über die Brückenlänge eingezogen. Im Anschluss werden die verbundlosen Längsspannglieder angespannt und in den Randsegmenten verankert. Durch die Vorspannung werden die Segmente und die Fugen zwischen den Segmenten überdrückt.

Das Erstellen des Verbunds zwischen den Segmenten und den Längsträgern erfolgt erst nach Vorspannen der Segmente in Brückenlängsrichtung. Würde der Verbund vor dem Längsvorspannen erfolgen, käme es zu einem teilweisen Abfließen der Längsvorspannkraft in den Stahlträger und vor allem zu ungünstigen Beanspruchungen des Stahlträgers in den Feldbereichen. Der Verbund zwischen den Segmenten und den Stahlträgern wird durch das Verfüllen der Verbundfuge hergestellt. Dabei wird der Beton über die Einfüllöffnungen in den Hohlraum zwischen den Segmenten und dem Hohlkasten eingebracht. Nach dem Erhärten der Verbundfuge werden die Fahrbahnabdichtung und der Fahrbahnbelag aufgebracht. Zudem werden zur Fertigstellung des Überbaus die Schutzeinrichtungen und die Geländer montiert (Bild 15c).

Die VSM-Bauweise eignet sich insbesondere für Ersatzneubauten über besonders frequentierte Verkehrswege von Ein- und Zweifeldbauwerken mit bis zu 80 m Gesamtstützweite.

4.4 Wissenschaftliche Untersuchungen

Im Rahmen einer Masterarbeit am Lehrstuhl für Massivbau der Technischen Universität München wurde das Tragverhalten von Brückenbauwerken in VSM-Bauweise detailliert analysiert. Untersucht wurde dabei insbesondere die Schubkraftübertragung zwischen der Verbundfuge und dem Stahllängsträger. Zur Ermittlung der zu übertragenden Schubkräfte in der Verbundfuge wurde sowohl ein Modell einer Einfeld- als auch ein Modell einer Zweifeldbrücke computergestützt entworfen und berechnet. Diese globalen Modelle wurden mit dem Softwarepaket der SOFiSTiK AG erstellt.

Die detaillierte Untersuchung der Schubkraftübertragung zwischen der Verbundfuge und dem Stahllängsträger wurde mithilfe einer materiell nichtlinearen, numerischen Berechnung anhand eines Teilmodells der Verbundfuge (im Folgenden: lokales Modell) durchgeführt. Die Modellierung und die Berechnung des lokalen Modells erfolgten mit der Software ABAQUS der Firma Dassault Systèmes Simulia Corporation.

4.4.1 Globale Modelle

Der Bauablauf ist bei der Tragwerksmodellierung und -berechnung von Verbundbrücken von großer Bedeutung. Die Besonderheit bei dem oben geschildertem Bauablauf der VSM-Bauweise liegt darin, dass sich während der Montage das Tragsystem der Brücke verändert. Vor dem Erhärten des Betons in der Verbundfuge liegen mit den Stahlträgern in Brückenlängsrichtung und den Segmenten in Brückenquerrichtung in der Tragwirkung voneinander unabhängige Tragsysteme vor. Dies ändert sich durch das Erhärten des Betons in der Verbundfuge, da nach diesem Vorgang die Segmente und die Stahllängsträger in Brückenlängsrichtung als Verbundquerschnitt wirken. Diese Systemänderung wurde bei den globalen Modellen durch eine getrennte Modellierung

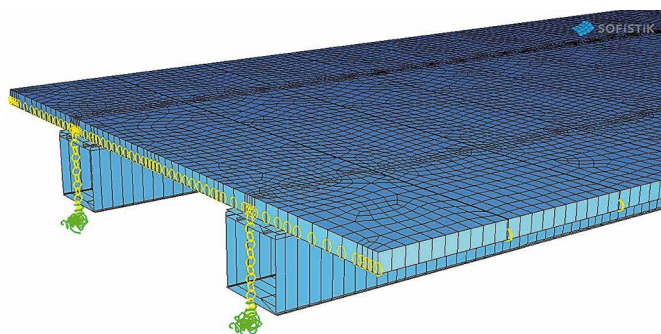


Bild 16 Ausschnitt des globalen SOFiSTiK-Modells der VSM-Brücke
Section of the global SOFiSTiK model of the VSM-bridge

der Fahrbahnplatte und der Stahllängsträger berücksichtigt. Über veränderbare Kopplungsbedingungen konnte das Erhärten des Betons in der Verbundfuge simuliert werden. Die einzelnen Segmente der Fahrbahnplatte wurden in dem Modell als zweiaxial abtragende, exzentrische Flächenelemente abgebildet (Bild 16). Die zentrische Kraftübertragung zwischen den einzelnen Segmenten erfolgt wiederum über Kopplungsbedingungen. Die Stahllängsträger und der Vergussbeton wurden als Stabelemente in das System integriert.

Mit den globalen Modellen wurden die jeweils erforderliche Blechdickenverteilung und die Anzahl der erforderlichen Längsspannglieder – insbesondere bei den Zweifeldbauwerken – ermittelt. Zudem wurden Parameterstudien zum Einfluss verschiedener Modelleigenschaften (Höhe der Verbundfuge, Kriechen und Schwinden etc.) durchgeführt. Ziel der durchgeführten Berechnungen war die Ermittlung der Schubbeanspruchung in der Verbundfuge.

4.4.2 Lokales Modell

Die Verbundfuge dient der Lastübertragung zwischen den beiden Modulen Fahrbahnplatte und Stahlträger. Ohne eine funktionierende Kraftübertragung trägt der Verbundquerschnitt nicht, weshalb diese genauer betrachtet wurde. Insbesondere sollte sichergestellt werden, dass die Schubbeanspruchungen in der Fuge unter Verwendung der Verbunddübelleisten [23] und einer vorgegebenen Bewehrung sicher abgetragen werden können. Frühere Untersuchungen am Lehrstuhl für Massivbau der TUM haben gezeigt, dass mithilfe von numerischen Simulationen mit dem Finite-Elemente-Programm ABAQUS das Trag- und Verformungsverhalten von Verbunddübelleisten sehr gut abgebildet werden kann [26, 27].

Zur Untersuchung der Verbundfuge der VSM-Bauweise wurde daher ebenfalls ein geometrisch und materiell nichtlineares Detailmodell mit ABAQUS erstellt. Das Modell bildet einen 2 m langen Ausschnitt der Verbundfuge ab (Bild 17). Im Modell wurden die Bauteile des Stahlkastens inkl. der Verbunddübelleisten, der Verbundfuge und des Betonsegments mit Volumenelementen ab-

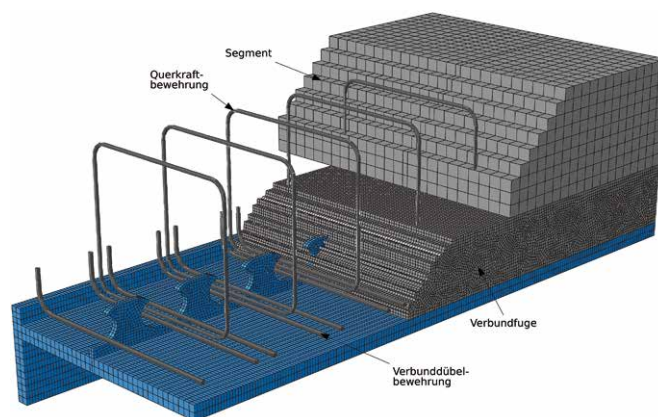


Bild 17 Aufbau des FE-Modells der Verbundfuge
Design of the FE-model of the composite joint

gebildet. Zusätzlich wurden die Querkraftbewehrung und die Verbunddübelbewehrung als eindimensionale Körper über einen Linienzug modelliert. Da der Aufbau der Verbundfuge symmetrisch ist, ist diese im Modell unter Berücksichtigung der Symmetriebedingungen in Brückenlängsrichtung halbiert abgebildet.

Zur näherungsweise Darstellung des komplexen Werkstoffverhaltens des Betons und des Stahls in der numerischen Simulation wurden Materialmodelle basierend auf der Plastizitätstheorie verwendet. Diese wurden im Vorfeld der eigentlichen Untersuchungen mithilfe von Kleinkörperversuchen überprüft. Hierbei konnte die Eignung der Materialmodelle bestätigt werden.

Anhand der Kleinkörperversuche wurden zudem die zur Verfügung stehenden Berechnungsverfahren verglichen. Für die Analyse des Teilmodells der Verbundfuge fiel dabei die Wahl auf die explizite Methode. Im Gegensatz zur impliziten Methode wird bei der expliziten Methode nicht das statische, sondern das dynamische Gleichgewicht angestrebt. Bei ausreichend kleinen Zeitinkrementen kann mit dieser Methode eine quasistatische Berechnung erfolgen. Die explizite Methode zeichnet sich durch eine hohe Stabilität der Berechnung und angemessene Berechnungszeiten aus [28]. Diese Vorteile zeigen sich vor allem bei Modellen mit komplexen Geometrien und

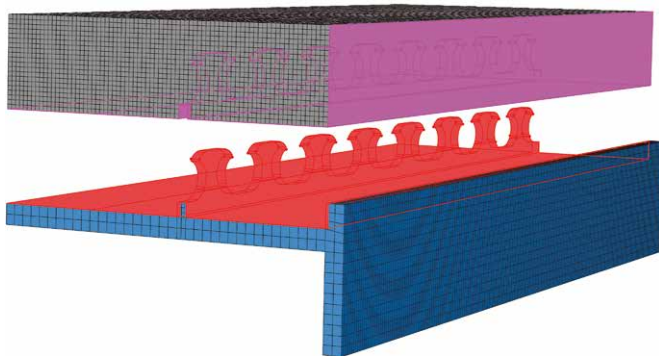


Bild 18 Kontaktfläche der Verbundfuge (pink) und des Stahlkastens (rot)
Contact surface of the composite joint (pink) and the steel girder (red)

Materialmodellen sowie bei Modellen mit vielen Freiheitsgraden.

Für die Kopplung zwischen Oberflächen von Elementen aus unterschiedlichen Materialien wurden Interaktions- bzw. Zwangsformulierungen definiert. So wurde bspw. für die Kopplung zwischen dem Stahlkasten und der Verbundfuge die Interaktionsformulierung Surface-to-Surface gewählt (Bild 18). Dabei wurde zur Kraftübertragung in Normalenrichtung ein „harter Kontakt“ und zur Kraftübertragung in tangentialer Richtung ein Reibungskontakt gewählt.

Die Lastaufbringung und die Lagerbedingungen des Teilmodells wurden so definiert, dass die Verbundfuge primär auf Schub beansprucht wird. An diesem FE-Modell wurden Parameterstudien zur Untersuchung des Einflusses verschiedener Systemvariablen auf die Schubtragfähigkeit der Verbundfuge untersucht. Dabei wurden u. a. die Dicke der Stahldübelbleiste und deren Stahlgüte variiert. Die Untersuchungen ergaben zum einen, dass eine dickere Verbunddübelbleiste zu einer höheren Schubtragfähigkeit, aber gleichzeitig zu einem niedrigeren Verformungsvermögen der Verbundfuge führt (Bild 19a). Zum anderen konnten die Parameterstudien zeigen, dass sich eine höhere Stahlgüte der Stahldübelbleiste vor allem auf die Schubtragfähigkeit positiv auswirkt (Bild 19b). Diese Erkenntnisse waren insbesondere vor dem Hintergrund, dass nicht die nach allgemeiner Bauartgenehmigung [23] vorgesehene Bügel- und Einfassbewehrung berücksichtigt wird, sehr aufschlussreich. Eine Änderung der Versagensart (z. B. zu einem sprödem Betonversagen) ist trotz der erforderlichen Bewehrungsanpassungen auch bei großen Stahldicken nicht zu erwarten. Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die Schubtragfähigkeit und das Verformungsvermögen ausreichend groß sind, um eine sichere Lastabtragung der Kräfte in der Verbundfuge zu gewährleisten. Dieses Ergebnis ist unabhängig von der Ausbildung als Ein- oder Zweifeldbrücke und zeigt, dass die Verbundfuge in der angedachten Form ausgeführt werden kann.

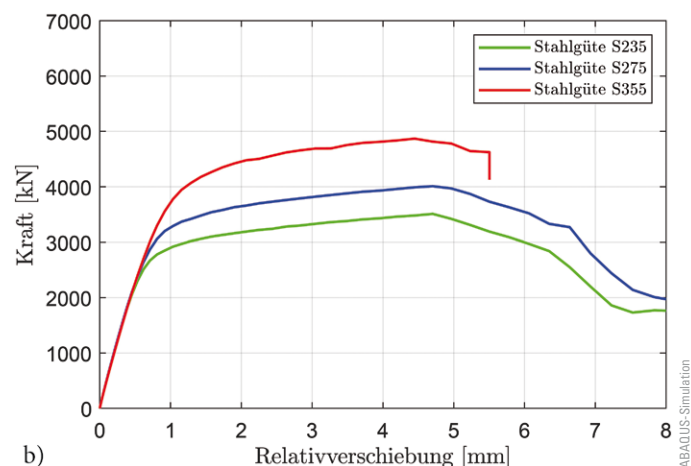
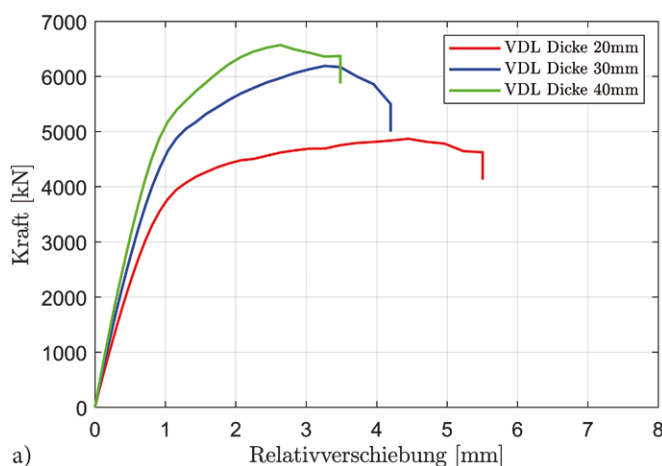


Bild 19 Kraft-Relativverschiebungsverläufe – Variation der Verbunddübelbleistdicke (a) und Variation der Stahlgüte (b)
Load-deformation curves – variation of composite dowel thickness (a) and variation of steel grade (b)

5 Verbund-Träger-Trog-Bauweise (VTT)

VTT ist das geschützte Markenzeichen der SSF Ingenieure AG für die Verbund-Träger-Trog-Modulbauweise. Die Fahrbahnplatte ist nicht wie bei einer Deckbrücke über den Längsträgern, sondern zwischen ihnen in der Ebene des Untergurts der Längsträger angeordnet.

5.1 Bedarf und Einsatzorte

Trogbrücken zeichnen sich durch eine sehr geringe maßgebende Bauhöhe aus, die mindestens durch die Stärke der Fahrbahnplatte mit Belag bestimmt wird. Klimaforscher registrieren seit Mitte der 1980er-Jahre eine Zunahme rekordverdächtiger Regenfälle um mehr als 20%, die Wasserwirtschaft reagiert darauf und erhöht die Durchflussquerschnitte. Geringe Bauhöhen für Überführungen von Verkehrswegen über Bäche und Flüsse sind deshalb stetig mehr gefragt.

Mit fortschreitender Verdichtung bestehender Siedlungsräume und Zunahme von Verkehrsinfrastrukturen in Form von Autobahnen, Bahndämmen, Industrie- und Gewerbeanlagen werden bestehende Quartiere schwieriger erreichbar. Die Erreichbarkeit und Zugänglichkeit bestimmen u. a. die Qualität eines Quartiers. Trogbrücken mit ihrer geringen maßgebenden Bauhöhe können helfen, Stadtgrundrisse durchlässig zu erhalten und eine Verinselung zu vermeiden. Oben liegende Tragwerke wie Bögen und Fachwerke sind im urbanen Umfeld oft unerwünscht. Es gibt einen erhöhten Bedarf für Trogbrücken, und Stahlverbundmodulbauweisen bieten die besten Voraussetzungen für wirtschaftliche und gut gestaltete Lösungen der Planungsaufgabe. Bild 20 zeigt die optisch ansprechende Gestaltung einer Trogbrücke, wie sie mithilfe der VTT-Bauweise modular errichtet werden kann. Es handelt sich hierbei um eine Trogbrücke über die Salzach bei Kaprun, die ebenfalls modular (allerdings noch mit Halbfertigteilen) realisiert wurde [29].

5.2 Konstruktive Ausbildung

Die Hauptträger mit Kastenquerschnitt, offenen Profilen oder Rohrfachwerken werden i. d. R. mit Stahl S460 ausgeführt. Die Tragstruktur in Querrichtung der Brücke bilden vorgespannte Querträger in selbstverdichtendem Beton der Güte C50/60, auf die Fahrbahnvollsegmente verlegt werden. Der Verbund der einzelnen Module untereinander erfolgt mit selbstverdichtendem Vergussbeton der Güte C50/60.

5.3 Bauzeit und Planung

Nach Fertigstellung der Unterbauten werden bei Einfeldträgern mit einer Stützweite bis 60 m die beiden Hauptträger mit einem Kran verlegt und durch die Betonquerträger stabilisiert. Anschließend werden die Fahrbahnseg-



Bild 20 Beispiel für die Ansicht einer Stahlverbund-Trogbrücke (über die Salzach bei Kaprun)
Example for the view of a trough bridge (over the Salzach river near Kaprun)

mente verlegt und die Fugen vergossen. Der Rohüberbau einer Einfeldbrücke mit 600 m² Nutzfläche kann innerhalb einer Woche erstellt werden.

Wie alle Modulbauweisen bedingt die VTT-Modulbauweise, dass der Entwurfsverfasser durchgehend für alle Planungs- und Bauphasen tätig wird. Er schuldet neben der Genehmigungs- und Ausführungsplanung in Abstimmung mit den produzierenden und ausführenden Firmen digitale Modelle des Fertigungs- und Montageprozesses der Module.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Bestrebungen Brücken modular zu entwerfen und zu realisieren gibt es schon sehr lange. Im Ausland hat sich eine Vielzahl von unterschiedlichen Modulbauweisen bereits durchgesetzt, sie werden dort stetig verwendet und weiterentwickelt. Die Hauptargumente hierfür sind die kürzeren Bauzeiten und die durch Vorfertigung gewährleistete hohe Qualität. Verkürzte Bauzeiten bedeuten geringere Kosten und (aufgrund der geringeren Verkehrsbehinderung) eine verbesserte Akzeptanz der Bevölkerung. Durch die serielle, qualitativ hochwertige Vorfertigung im Werk erreichen modulare Bauwerke i. d. R. eine extrem gute Dauerhaftigkeit, wodurch sich in Verbindung mit der leichten Um- und Rückbaubarkeit sehr nachhaltige Bauwerke realisieren lassen. Modulare Bauweisen im Stahlverbundbau bieten darüber hinaus den Vorteil, dass die Transportgewichte der Haupttragerelemente aus Stahl deutlich unter denjenigen massiver Bauweisen liegen.

Selbstverständlich muss der Verbindung zwischen den Einzelelementen, also dem Fügen von modularen Segmenten zu einer Einheit, eine besondere Beachtung zukommen. Diese Schnittstellen müssen sorgfältig konstruiert und nachgewiesen werden. Auf Basis der Erkenntnisse aus den bereits realisierten Bauwerken (vgl. u. a. die Brücken in VTR-Bauweise) sowie infolge der Entwicklungen in Forschung und Wissenschaft (Stichworte: UHPC, DFG-Schwerpunktprogramme) gibt es hierfür jedoch

neben den bereits erprobten Varianten auch viele innovative, wissenschaftlich abgesicherte Lösungsansätze.

Vor den aktuellen Herausforderungen unserer Zeit mit einem fortwährend steigenden Verkehrsaufkommen und dem Anspruch, sowohl die Umweltbeeinflussung als auch die volkswirtschaftlichen Kosten möglichst zu minimieren, bieten modulare Bauweisen daher eine einfache und gute Lösung. In diesem Aufsatz werden verschiedene Modulbauweisen im Verbundbrückenbau vorgestellt, mit denen sich die allermeisten (Ersatz-)Neubauten realisieren lassen können. Die in Polen und Rumänien realisierten Bauwerke der VTR-Bauweise belegen neben der Ausführbarkeit auch die Effizienz dieser Modulbauweise für

mehrfeldrige Talbrücken. Bei kurzen Spannweiten und Überführungsbauwerken steht die kürzlich entwickelte VSM-Bauweise zur Verfügung. Für Trogbrücken ist die Stahlverbund-Modulbauweise geradezu prädestiniert.

Bei allen vorgestellten Modulbauweisen sind derzeit noch eine konventionelle Abdichtung und ein Fahrbahnbelag vorgesehen. Für die Zukunft sollte untersucht werden, ob aufgrund des extrem dichten Betongefüges bei Herstellung im Fertigteilverk nicht systematisch auf Abdichtung und Belag verzichtet werden kann, wie das u. a. bei den segmentierten Pilotprojekten mit Stahlverbundträgern (Brücke Greißelbach, OU Mühlhausen) ausgeführt wurde und bereits seit einigen Jahren im Betrieb erprobt wird.

Literatur

- [1] Fischer, O.; Müller, A.; Lechner, T. et al. (2014) *Ergebnisse und Erkenntnisse zu durchgeführten Nachrechnungen von Betonbrücken in Deutschland* in: Beton- und Stahlbetonbau 109, H. 2, S. 107–127.
- [2] Marzahn, G.; Mertzsch, O.; Kramer, L. (2020) *Der Traglastindex zur Bewertung struktureller Eigenschaften von Straßenbrücken* in: Stahlbau 89, H. 10, S. 865–873.
- [3] Gabler, M.; Fakhouri, A.; Baumann, K. (2019) *Zur Gestaltung von Fertigteilterbrücken* in: Bautechnik 96, H. 2, S. 142–149.
- [4] Van der Horst, A.; Burtet, P.; Cayron, F.; Fischer, O. et al. (2017) *Precast segmental bridges – guide to good practice* in: *fédération internationale du béton [eds.] fib bulletin 82, 08/2017*. ISBN 978-2-88394-122-9
- [5] Berthelley, J. (2009) *Composite element bridges in France – Experiences of prefabricated slab decks* in: Collin, P.; Hällmark, R.; Nilsson, M. [eds.] *International Workshop on Prefabricated Composite Bridges*. Stockholm, 4. März 2009, pp. 45–62.
- [6] FHWA-HRT-14-084 (2014) *Design and Construction of Field-Cast UHPC Connections*. Federal Highway Administration (FHWA); TECH NOTE No: FHWA-HRT-14-084 96. Oct. 2014.
- [7] Dauner, H.-G. (2002) *Techniken zum Bau der Fahrbahnplatte bei Verbundbrücken* in: Stahlbau 71, H. 8, S. 625–631.
- [8] Geißler, K.; Reintjes, K.-H.; Rodemann, J. (2009) *Ganzfertigteile bei der Verbundfahrbahnplatte der Bahretalbrücke – Eine Revision nach Ausführung und baubegleitender messtechnischer Überwachung* in: Stahlbau 78, H. 12, S. 897–906.
- [9] Mark, P.; Forman, P. (2019) *Schneller Bauen durch intelligente Vorfertigung – das Schwerpunktprogramm 2187* in: DBV Rundschreiben 263, Dez. 2019, S. 12–13.
- [10] Fiedler, E. (2001) *Die Entwicklung des Stahlbrückenbaues in der DDR bis zum Zeitpunkt der Wende – Ein Rückblick (Teil II)* in: Stahlbau 70, H. 5, S. 317–328.
- [11] Collin, P.; Johansson, B. (1999) *Wettbewerbsfähige Brücken in Verbundbauweise* in: Stahlbau 68, H. 11, S. 908–918.
- [12] Culmo, M. (2009) *Prefabricated Composite Bridges in the United States including Total Bridge Prefabrication* in: Collin, P.; Hällmark, R.; Nilsson, M. [eds.] *International Workshop on Prefabricated Composite Bridges*. Stockholm, 4. März 2009, pp. 141–153.
- [13] Gordon, S. R.; May, I. M. (2009) *Precast deck systems for steel-concrete composite bridges* in: Collin, P.; Hällmark, R.; Nilsson, M. [eds.] *International Workshop on Prefabricated Composite Bridges*. Stockholm, 4. März 2009, pp. 167–197.
- [14] Ralls, M. L. et al. (2005) *Prefabricated Bridge Elements and Systems in Japan and Europe*. No. FHWA-PL-05-003. United States. Federal Highway Administration. Office of International Programs, March 2005.
- [15] Shim, C.-S.; Chung, C.-H.; Kim, I.-K.; Kim Y.-J. (2020) *Development and Application of Precast Decks for Composite Bridges* in: *Structural Engineering International* 20, no. 2, pp. 126–133.
- [16] Balder, T.; Schimanski, A. (2019) *Brücke Hammacher Str. über die BAB 46 in Hagen* in: BFT International, H. 2, S. 31–32.
- [17] Hällmark, R.; Collin, P.; Stoltz, A. (2009) *Innovative Prefabricated Composite Bridges* in: Collin, P.; Hällmark, R.; Nilsson, M. [eds.] *International Workshop on Prefabricated Composite Bridges*. Stockholm, 4. März 2009, pp. 121–140.
- [18] Harju, T. (2009) *Case Laisentianjoki bridge – Cantilever bridges with Prefabricated deck elements* in: Collin, P.; Hällmark, R.; Nilsson, M. [eds.] *International Workshop on Prefabricated Composite Bridges*. Stockholm, 4. März 2009, pp. 105–109.
- [19] Hällmark, R.; White, H.; Collin, P. (2012) *Prefabricated Bridge Construction across Europe and America* in: *Practice Periodical on Structural Design and Construction* 17, no. 3, pp. 82–92.
- [20] AIF-Forschungsvorhaben *Verzinkungsgerechte Konstruktion integraler Rahmenbrücken mit mittlerer Spannweite mit fertigungsgerechtem Fügen durch Hochleistungs-Vergussmörtel*. IGF-Nr.: 20312 N.
- [21] Seidl, G.; Hierl, M.; Brey, M.; Mensinger, M.; Stambuk, M. (2016) *Segmentbrücke Greißelbach als Stahlverbundbrücke ohne Abdichtung und Asphalt* in: Stahlbau 85, H. 2, S. 126–136.
- [22] Doss, W. et al. (2001) *VFT-Bauweise – Entwicklung von Verbundfertigteilterträgern im Brückenbau* in: Beton- und Stahlbetonbau 96, H. 4, S. 171–180.
- [23] Deutsches Institut für Bautechnik (Dibt) (2018) *Allgemeine Bauartgenehmigung für Stahlverbundträger mit Verbunddübelleisten in Klothoiden- und Puzzleform*. Z-26.4-56. Berlin.
- [24] Geißler, K.; Gebert, G. (2020) *Zu Entwurf, Konstruktion und Berechnungsspezifika von aktuellen Großbrücken in Stahlverbundbauweise* in: Stahlbau 89, H. 2, S. 148–163.
- [25] Gunreben, Y.-C.; Marzahn, G. (2020) *Planungshilfen im Stahl- und Stahlverbundbau* in: Stahlbau 89, H. 2, S. 92–99.
- [26] Lechner, T.; Fischer, O. (2020) *Untersuchungen zum Tragverhalten von Verbunddübelleisten in schlanken Stegen aus ultrahochfestem Beton* in: Beton- und Stahlbetonbau 115

(zur Veröffentlichung angenommen). <https://doi.org/10.1002/best.202000090>

[27] Lechner, T.; Gehrlein, S.; Fischer, O. (2016) *Structural Behaviour of Composite Dowels in thin UHPC-Elements* in: *Steel Construction* 9, no. 2, pp. 132–137.

Autoren

Dr.-Ing. Thomas Lechner (Korrespondenzautor)
tlechner@ssf-ing.de
SSF Ingenieure AG, Leiter Entwicklung
Domagstraße 1a
80807 München

Dipl.-Ing. Victor Schmitt
vschmitt@ssf-ing.de
SSF Ingenieure AG, Aufsichtsrat
Domagstraße 1a
80807 München

Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirt. Ing. Oliver Fischer
oliver.fischer@tum.de
Technische Universität München, Lehrstuhl für Massivbau
Theresienstraße 90, Gebäude N6
80333 München

[28] Dassault Systèmes Simulia Corp. [eds.] (2017) *ABAQUS 2017 Documentation*.

[29] Seidl, G. et al. (2019) *Brücke über die Salzach bei Kaprun* in: *Stahlbau* 88, H. 5, S. 488–498.

Johannes Kempf, M.Sc.
jkempf@ssf-ing.de
SSF Ingenieure AG, Projektingenieur
Domagstraße 1a
80807 München

Zitieren Sie diesen Beitrag

Lechner, T.; Schmitt, V.; Fischer, O.; Kempf, J. (2021) *Modulbauweisen im Verbundbrückenbau – Rückblick und aktuelle Tendenzen beim Bau von Brücken mit kleinen und mittleren Spannweiten*. *Stahlbau* 90, H. 2, S. 116–127. <https://doi.org/10.1002/stab.202000094>

Dieser Aufsatz wurde in einem Peer-Review-Verfahren begutachtet. Eingereicht: 6. November 2020; angenommen: 15. Dezember 2020.

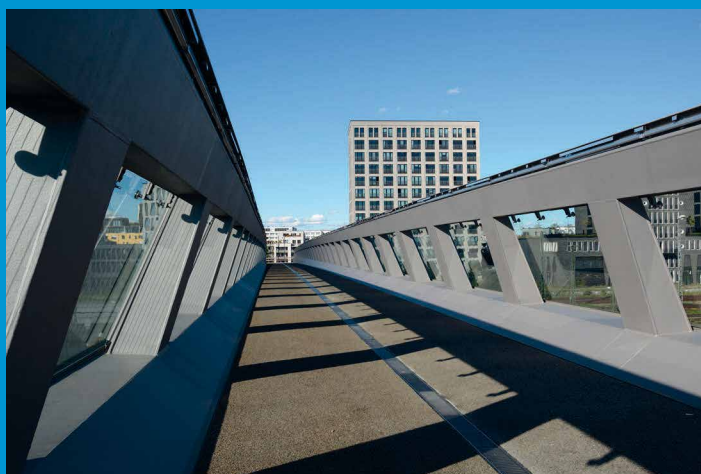


SSF Ingenieure

SSF Ingenieure – Begeisterung für Engineering



Monobogen / Überführung
der St 2312 über die A3
Brückenlänge 108,30 m
Stahlverbundbauweise



Brücke Arnulfparksteg
München
Brückenlänge 240,30 m
Querung von 37 Bahngleisen
Stählerner Vierendeelträger



Brücke über die Salzach
bei Kaprun / Österreich
Brückenlänge 56 m
Modulare Stahlverbund-
Trogbrücke