Zeitschrift: Tec21

Herausgeber: Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein

Band: 127 (2001)

Heft: 24: Faserverbundmaterialien

Artikel: Faserverbundmaterialien im Brückenbau: Sachstand, Anwendungs- und Forschungsempfehlungen

Autor: Keller, Thomas

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-80168

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 10.12.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Thomas Keller

Faserverbundmaterialien im Brückenbau

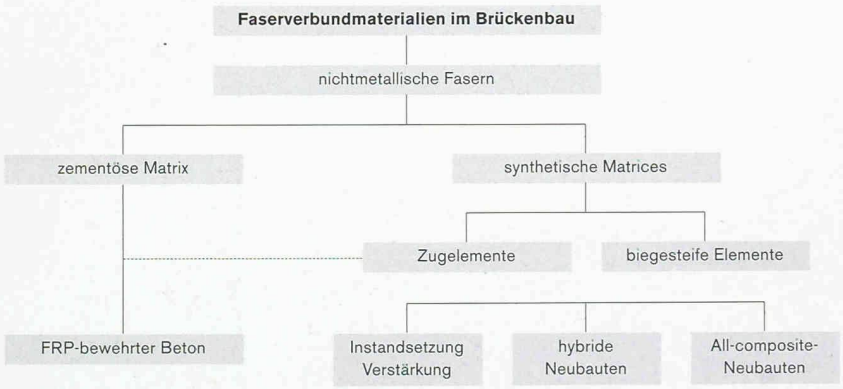
Sachstand, Anwendungs- und Forschungsempfehlungen

Sie sind leicht, fest, frei formbar und beständig: die neuen Verbundmaterialien mit Glas-, Kohle- und Aramidfasern. Ihre Vorteile erlauben vielseitige neue Anwendungen. Nur die technischen und gestalterischen Konzepte sind die alten und nutzen die neuen Möglichkeiten noch wenig. Das Composite Construction Laboratory der ETH Lausanne erforscht materialgerechte Konzepte und präsentiert seinen Sachstand-Bericht zu den internationalen und Schweizer Anwendungen im Brückenbau.

Faserverbundmaterialien fanden in den letzten Jahren vermehrt Anwendung als Tragstrukturelemente von Brückenbauten. Zurückzuführen ist dies auf die vorzüglichen Eigenschaften dieser Materialien wie geringe Eigenlast bei hoher Festigkeit, freie Formbarkeit, weit gehende Korrosions- und Ermüdungsbeständigkeit sowie Unterhaltsfreiheit. Vor diesem Hintergrund erteilte das Bundesamt für Strassen (Astra) dem neu gegründeten Labor CCLab (Composite Construction Laboratory) an der ETH Lausanne den Auftrag, einen Sachstandsbericht[1] zur Anwendung von Faserverbundmaterialien im Brückenbau mit Anwendungs- und Forschungsempfehlungen auszuarbeiten. Der folgende Artikel ist eine Zusammenfassung des Berichtes.

Übersicht und Abgrenzung

Unter Faserverbundmaterialien (Fibre Reinforced Polymers, FRP) werden nichtmetallische Fasern verstanden – vor allem Glas-, Kohle- sowie Aramidfasern –, die in synthetische oder zementöse Matrices eingebettet sind. Den Fasern kommt dabei in erster Linie die Tragfunktion zu, die Matrices beinhalten Krafteinleitungs-, Formgebungs- sowie Schutzfunktionen. Faserverbundmaterialien werden zuerst industriell zu Halbzeugen und Bauteilen verarbeitet, die alsdann auf der Baustelle aufgrund der geringen Eigenlast einfach, schnell und mit minimalen Verkehrsunterbrüchen aufgebracht oder montiert werden. Vier Einsatzgebiete können grundsätzlich unterschieden werden: FRP-bewehrter Beton, Instandsetzung und Verstärkung bestehender Brücken, hybride Neubauten in Verbund mit traditionellen Materialien sowie so genannte All-composite-Neubauten mit ausschliesslicher Verwendung von FRP-Materialien (Bild 1).



1
Klassifikation und Abgrenzung

Sachstand Bauteile

FRP-Bauteile werden in erster Linie aus Fasern hergestellt, die in synthetische Matrices eingebettet werden. Dabei unterscheidet man zwischen biegeweichen Zugelementen und biegesteifen Elementen mit linearer oder flächiger Tragwirkung.

Zugelemente

Zugelemente werden heute als Verstärkungselemente für bestehende Brücken, als Betonbewehrungen für Neubauten (schlaff oder vorgespannt) oder als externe Kabel eingesetzt. Entsprechende Systemlösungen wurden in Japan, Europa und den USA entwickelt.

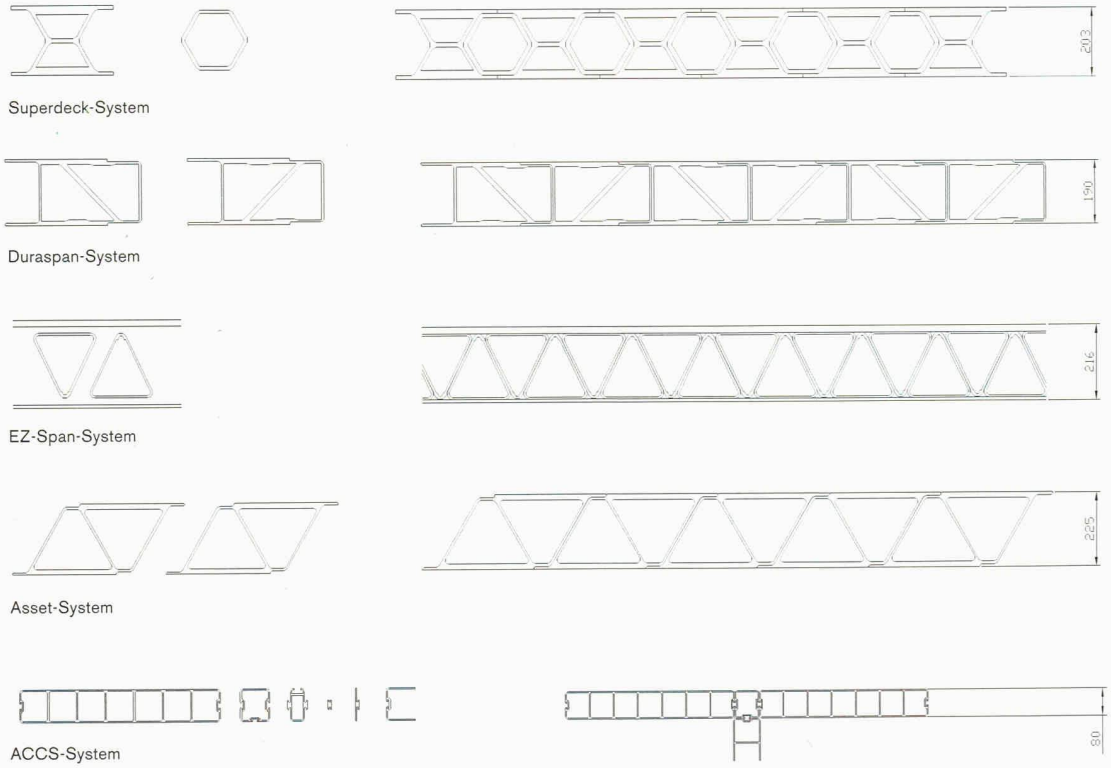
Als Verstärkungselemente zur Verfügung stehen dabei aufklebbare unidirektionale Lamellen oder flächige Elemente – zumeist Gelege oder Gewebe –, die «nass» in der Matrix aufgebracht oder als vorgefertigte Halbzeuge aufgeklebt werden. Bei FRP-Bewehrungsstäben stehen aufgrund der Kosten zurzeit Glasfaserstäbe im Vordergrund, die jedoch noch mit erheblichen Unsicherheiten hinsichtlich Dauerhaftigkeit im alkalischen Milieu einerseits sowie mit Spannungsrisskorrosion andererseits behaftet sind. Der Transport und das Verlegen der schlagempfindlichen Stäbe sowie die notwendigen Sicherungen gegen Aufschwimmen erschweren die praktische Anwendung.

Im Gegensatz zu Stäben werden bei Kabeln aufgrund möglicher Spannungsrisskorrosion sowie vergleichsweise geringer Steifigkeit von Glasfasern vorzugsweise Kohle- oder Aramidfasern eingesetzt. Die leichten Kabelsysteme zeichnen sich durch kleine Bündelabmessungen mit entsprechenden Vorteilen beim Einbau aus sowie der Möglichkeit zur kontinuierlichen Überwachung mit integrierten faseroptischen Sensoren. Für kurzzeitige Einsätze stehen kompakte Keilverankerungen zur Verfügung. Für den Langzeiteinsatz werden Verbundanker eingesetzt; die Kraftübertragung von den Kabeldrähten auf die vergleichsweise langgestreckten Hülsen erfolgt in zementösen oder synthetischen Verbundmassen.

Biegesteife Elemente

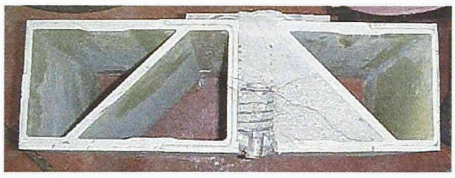
Als biegesteife Bauteile werden heute Träger- sowie Plattenelemente hergestellt. Trägerelemente werden in Form von pultrudierten Profilen, gewickelten Rohren oder handlaminiert mit speziellen Querschnitten angeboten. Als Verbindungstechnik werden mehrheitlich noch Schraubverbindungen eingesetzt, der Übergang zu wesentlich materialgerechteren Klebeverbindungen ist im Gange.

FRP-Plattenelemente werden im Brückenbau vor allem für Fahrbahnplatten eingesetzt. Diese zeichnen sich im Wesentlichen durch eine geringe Eigenlast aus – rund 20 % einer vergleichbaren Betonplatte –, weit gehende Korrosions- und Ermüdungsbeständigkeit sowie Unterhaltsfreiheit bei schneller Installation mit minimalen



2
Pultrudierte FRP-Fahrbahnplattensysteme

Verkehrsunterbrüchen. Verwendet werden ausschliesslich Glasfasern sowie Polyester oder Vinylester als Matrices.
In den USA wurden bereits mehrere Bausysteme für Fahrbahnplatten entwickelt. In Entwicklung befinden sich weitere Systeme in Kanada und in Dänemark. In England existiert bereits das ACCS-System, das sich vor allem für Fussgängerbrücken eignet. Die Mehrzahl der Plattensysteme ist aus im Pultrusionsverfahren hergestellten und anschliessend zusammengeklebten Profilen aufgebaut (Bild 2). Die Plattenstärken sind dadurch konstant und heute je nach System auf 75 bis 225 mm beschränkt. Die maximalen Spannweiten der quergespannten Platten betragen deshalb weniger als 3 m, was eine Primärtragstruktur aus mehreren unten liegenden Längsträgern erfordert. Beim Ersatz von bestehenden Fahrbahnplatten können bestehende Träger aus Stahl oder Beton verwendet werden. Im Weiteren wird durch die konstante Stärke die Ausbildung von Quergefällen erschwert. Diese müssen über den Verbund erschwerende Aufdoppelungen zwischen Trägern und Platten oder allenfalls im Belag realisiert werden.
Unterschiedlichste Verbundsysteme zwischen diesen Plattenelementen selbst und zwischen Platten und Trägern wurden entwickelt (Kleben, Dübel, Schrauben, Bild 3). Einzelne erlauben die Mitwirkung der Platten auch als Zug- und Druckgurt in Brücken-Längsrichtung, andere dienen nur der Plattenfixierung. Ebenso werden verschiedenartigste Lösungen zur Befestigung von Leitschranken angeboten.
Andere Systeme werden in Sandwichbauweise in speziellen Forminjektionsverfahren (Hardcore-System, Bild 4) oder noch handlaminiert hergestellt (Kansas-System). Sie bieten gegenüber den pultrudierten Systemen mehrere konstruktive Vorteile: Die Plattenstärken sind variabel und können einer grösseren Spannweite oder einem Quergefälle angepasst werden. Die bis heute grösste Spannweite liegt bei rund 10 m. Während der Plattenherstellung besteht zudem die Möglichkeit, Anschluss- oder Verbindungsteile in Form von Inserts in die Platten einzubauen. In einzelne Systeme werden faseroptische Sensoren integriert, die eine kontinuierliche Fernüberwachung erlauben. Als Beläge werden mehrheitlich Polymerbetone von geringer Stärke eingesetzt, die oft noch vor der Installation auf den Platten aufgebracht werden.

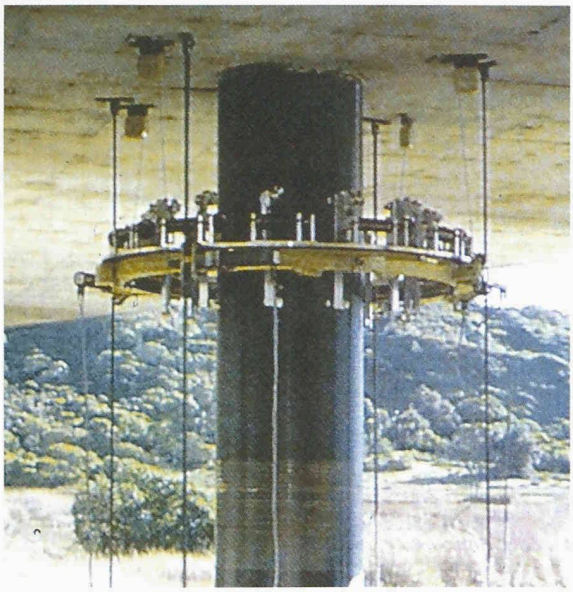


3
Kopfbolzenverbindung zwischen Stahlträger und FRP-Fahrbahnplatte (Bild: Martin Marietta Composites)

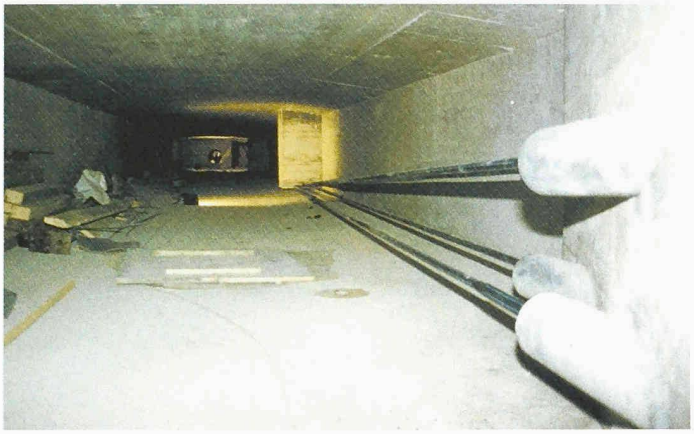
4
Vorgefertigte FRP-Brückenplatte (Bild: Hardcore Composites)

Sachstand FRP-bewehrter Beton

Bei FRP-bewehrtem Beton wird die Stahlbewehrung teilweise oder vollständig durch Fasern (Kurzfasern, Textilien) oder Faserverbundmaterialien (Stäbe und interne Vorspannkabel) ersetzt. Kurzfaserbewehrter Beton wird in Europa in erster Linie beim jungen Beton im Rahmen von Instandsetzungen zur Rissbegrenzung eingesetzt, eine signifikante Traglasterhöhung wird dadurch nicht erreicht. In Kanada wird eine weitere Anwendung im Rahmen der «Steel-Free Deck»-Technologie entwickelt. Verkehrslasten werden dabei in nur mit nichtmetallischen Kurzfasern bewehrten Betonplatten quer über Bogenwirkung auf längslaufende Stahlträger abgetragen. Die oberen Flansche der Stahlträger sind dabei in Querrichtung mit angeschweissten, frei liegenden Stahlzugbändern verbunden. Diese Technologie fand bisher in vier Brücken Anwendung.
Textilbewehrter Beton wird vor allem in Deutschland im Rahmen des 1999 an der RWTH Aachen eingerichteten Sonderforschungsbereiches 532 entwickelt. Die Technologie fand bisher noch keine unmittelbare Anwendung im Brückenbau.
FRP-Bewehrungsstäbe und Vorspannsysteme werden vor allem in Japan und Kanada im Rahmen von Pilotanwendungen, weniger in den USA und in Europa eingesetzt. In Japan wird die Entwicklung durch die ACC-Vereinigung (Advanced Composite Cable Club), die Materialhersteller, Bau- und Designfirmen umfasst, vorangetrieben. In Kanada wurde 1995 das Isis-Netzwerk (Intelligent Sensing for Innovative Structures) gegründet. Die Isis-Anwendungen werden meistens mit materialintegrierten faseroptischen Sensoren ausgerüstet, die eine Fernüberwachung erlauben. In den USA geht die Entwicklung bei Fahrbahnplatten im Gegensatz zu Kanada (Steel-Free-Deck-Technologie) deutlich Richtung All-composite-Konstruktionen (vgl. folgende Abschnitte). In Europa wurde 1993 das Eurocrete-Forschungsprogramm zur Entwicklung von FRP-Bewehrungen gestartet, in dessen Rahmen 1995 die Fidgett's und 1996 die Oppegaard-Fussgängerbrücke gebaut wurde. 1996 wurde die «fFb Task Group 9.3 – FRP Reinforcement for Concrete



5
Automatisierte Stützenverstärkung mit Kohlefasern (Bild: XXsys Technologies)



6
Brücke Verdasio, Verstärkung mit Kohlefasern

Structures» gegründet, die ähnliche Ziele wie das Eurocrete-Programm verfolgt. Zu ihrer Unterstützung wurde das ConFibreCrete-Netzwerk gebildet. 1999 wurde in Herning die bisher letzte Fussgängerbrücke mit FRP-bewehrtem Beton gebaut. Verwendet wurden dabei CFCC-Stäbe und -Kabel. Konsequenterweise weist die Brücke keine Abdichtung auf.

Sachstand Instandsetzung und Verstärkung

Zur Verstärkung bestehender Brücken werden in erster Linie Lamellen, Gelege und Gewebe, vorgespannte Stäbe sowie externe Kabel verwendet. Eingesetzt werden diese Techniken wiederum vor allem in Japan, Kanada, den USA sowie in Europa.

In Japan bestehen zwei Vereinigungen zur Förderung von FRP-Verstärkungen, die Carbon Fiber Repair and Reinforcement Research Association sowie die Society of Aramid Reinforcement Systems. Die Vereinigungen umfassen Materialhersteller sowie Generalunternehmer und arbeiten eng mit den Behörden zusammen. Verstärkungen sind in Japan vor allem für Fahrbahnplatten aufgrund von Nutzlasterhöhungen sowie für Stützen gegen Erdbebeneinwirkung notwendig. Insgesamt wurden bisher über 1000 Brückenpfeiler verstärkt. Der Verbrauch von Kohlefaser-Gelegen hat sich nach dem Kobe-Erdbeben 1995 innerhalb eines Jahres auf 600 000 m^2 verdreifacht. Im Rahmen von Pilotanwendungen wurden einige wenige Brücken bisher mit Kabeln verstärkt.

In Kanada werden Lamellen und Gelege im Rahmen von Isis-Demonstrationsprojekten, oft in Verbindung mit faseroptischen Sensoren, eingesetzt. Entwickelt wird im Weiteren die NSM-Technologie (Near Surface Mounted Rods). Zu Verstärkungszwecken werden FRP-Bewehrungsstäbe in kleinen Schlitzen in den Überdeckungsbeton eingeklebt.

Ähnlich wie in Japan nach dem Kobe-Erdbeben hat sich in den USA 1994 nach dem Northridge-Erdbeben die Verstärkung, insbesondere von Stützen mit Gelegen, etabliert. Im Unterschied zu Japan, wo vor allem der Tragwiderstand erhöht wird, wird in den USA in erster Linie die Verformbarkeit durch Umwicklung erhöht (Bild 5). Im Rahmen von Fahrbahnplatten-Instandsetzungen wurden im Weiteren seit 1998 bei sechs Brücken Betonfahrbahnplatten durch leichte FRP-Platten ersetzt. Der Staat Ohio hat unlängst beschlossen, bis in fünf Jahren 100 FRP-Fahrbahnplatten des Systems Hardcore zu installieren.

In Europa wird nahezu überall mit FRP-Verstärkungen von Brücken experimentiert. Das Stadium von Pilotanwendungen überwunden haben dabei Verstärkungen mit Kohlefaserlamellen. Zu erwähnen ist im Weiteren die 1999 durchgeführte Verstärkung der Brücke Verdasio in der Schweiz mit umgelenkten polygonal geführten Kohlefaserkabeln (Bild 6).

Sachstand hybride Neubauten

Bei hybriden Neubauten von Brücken werden bei einzelnen Bauteilen die traditionellen Materialien durch FRP-Materialien ersetzt (Materialsubstitution). Die Brückenkonzeptionen bleiben zumeist auf die Verwen-

dung traditioneller Materialien wie Beton oder Stahl ausgerichtet. Oft kann dadurch das Potenzial der neuen Materialien nur ungenügend genutzt werden. Bauteile, die substituiert werden, sind externe Kabel, Träger und Fahrbahnplatten.

Die erste Brücke mit externen FRP-Kabeln wurde 1996 in der Schweiz gebaut – die Storchenbrücke in Winterthur. Das als Schrägseilbrücke konzipierte Bauwerk wurde mit zwei BBR-Kohlefaserkabeln ausgerüstet. Seither wurden in der Schweiz, den Niederlanden und in Dänemark weitere Pilotbrücken mit externen Kabeln realisiert. Eine einzige hybride Brücke mit FRP-Trägern und einer Holzfahrbahnplatte wurde 1997 in den USA gebaut – die Tom's Creek Bridge.

Brücken mit FRP-Fahrbahnplatten und Trägern aus Stahl oder Beton wurden bisher in den USA und in China realisiert. Mit den eingangs beschriebenen Bausystemen wurden in den USA seit 1997 14 hybride Strassenbrücken gebaut. In China wurden von 1986 bis 1993 insgesamt acht hybride Fussgängerbrücken mit handlaminierten Sandwichplatten erstellt.

Eine erste hybride Brücke mit einer Anpassung der Konzeption an die neuen Materialien wurde im Jahre 2000 gebaut, die Kings Stormwater Channel Bridge in den USA. Die zweifeldrige Brücke weist eine Länge von 20,1 m sowie eine Breite von 13,0 m auf. Für die Stützen und Hauptträger wurden mit Leichtbeton gefüllte gewickelte Kohlefaserrohre verwendet. Die Betonfüllung verhindert dabei ein Ausbeulen der Rohre und dient gleichzeitig zur Verankerung von Verbindungselementen. Als Fahrbahnplatte wurde das Dura-Span-System eingesetzt (Bild 2).

Sachstand All-composite-Neubauten

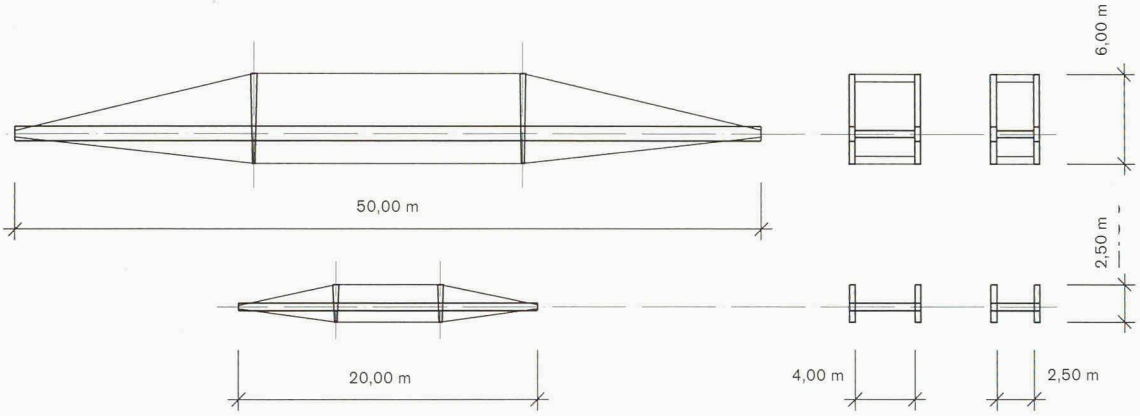
Unter All-composite-Neubauten werden insbesondere Brückenüberbauten verstanden, die ausschliesslich aus FRP-Materialien konstruiert sind. Die Unterbauten (Widerlager und Pfeiler) bestehen in der Regel aus traditionellen Materialien. Vor allem bei diesen Typen sind Unterschiede zwischen traditionellen Brückenkonzeptionen mit einfacher Materialsubstitution sowie ersten Ansätzen zu materialgerechten Neukonzeptionen ersichtlich.

Brücken mit Substitutionskonzepten wurden seit den 80er-Jahren vor allem in den USA gebaut. Dabei handelt es sich in erster Linie um Fussgängerbrücken mit seitlich oben liegenden Fachwerkträgern aus Glasfaser/Polyester-Standardprofilen. 1997 wurden vergleichbare Profil-Fachwerkbrücken in Kolding (Dänemark) und Pontresina (Schweiz) realisiert, im Jahre 2000 zudem zwischen Sedlitz und Senftenberg in Deutschland. Die Profilverbindungen wurden durchwegs geschraubt, bei der Pontresina-Brücke (Bild 7) wurden erstmals geklebte Verbindungen eingesetzt. In den USA wurden seit 1996 im Weiteren neun einfeldrige Strassenbrücken mit FRP-Fahrbahnplatten gebaut.

Bei den All-composite-Brücken mit Ansätzen zu Neukonzeptionen sind drei Entwicklungen erkennbar: Zu erwähnen ist zum Ersten das modulare ACCS-Bausystem aus pultrudierten Plattenelementen (Bild 2), mit dem 1992 die Aberfeldy-Fussgängerbrücke und 1994

7
FRP-Brücke Pontresina mit geklebten Verbindungen

8
FRP-Träger Smith Road Bridge (Bild: Martin Marietta Composites)



9a und 9b
An der ETH Lausanne entwickelte modulare Brückenkonzeption (Spannweite 20,0 – 50,0 m / Breite 2,5 – 4,0 m)

die «Bonds Mill Lift»-Strassenbrücke in Grossbritannien gebaut wurde. Zwei weitere Fussgängerbrücken wurden inzwischen erstellt.
Drei handlaminierte U-förmige Träger wurden im Weiteren 1997 bei der Smith Road (auch Tech 21 genannten) Brücke in Butler County, Ohio, eingesetzt (Bild 8). Die Träger sind mit FRP-Fahrbahnplatten-Elementen verklebt (System Dura-Span). Das Brückenkonzept stellt eine weitere Entwicklung der vom Flugzeughersteller Lockheed Martin entwickelten und 1995 gebauten INEEL-Brücke in Idaho Falls dar. Die Brücke wird mit integrierten faseroptischen Sensoren überwacht.
1982 wurde weltweit die erste FRP-Strassenbrücke in China erbaut, die Miyun-Brücke mit 20,7 m Spannweite. Die Brücke besteht aus sechs handlaminierten Glasfaser/Polyester-Sandwichträgern. Ein weiterführendes modulares Brückenkonzept, bestehend aus standardisierten Sandwichelementen, Profilen, Kabeln sowie Kleben als Hauptverbindungstechnik, wird zurzeit am CCLab der ETH Lausanne entwickelt (Bild 9).

Sachstand Bemessung, Normen und Richtlinien

Wohl aufgrund der Vielzahl von Faserarten, möglichen Faserarchitekturen, Matrices, Kombinationen von Fasern-Matrices sowie Anwendungsmöglichkeiten fehlen bis heute allgemein verbindliche und praxistaugliche Bemessungsverfahren und Anwendungsnormen. Im Vergleich zu traditionellen Materialien, die in ihren Eigenschaften relativ eng begrenzt sind, bilden bei FRP die Materialwahl und -zusammensetzung zusätzliche Konzeptparameter. In einzelnen Ländern wurden erste Normen für spezifische Anwendungen, vor allem für FRP-bewehrten und -verstärkten Beton, ausgearbeitet. Zur Verfügung stehen für einzelne Produkte wie Lamellen oder Profile Anwendungsrichtlinien oder Designhandbücher der Hersteller. Mangels verbreitet akzeptierter Bemessungsverfahren soll im Folgenden nur auf einige charakteristischen Aspekte von FRP hingewiesen werden:

Tragsicherheit

Vor allem bedingt durch mögliche Spannungsrisskorrosion sind Kurzzeit- sowie Langzeit-Tragsicherheit zu unterscheiden. Dies insbesondere bei Verwendung von Glasfasern, deren Langzeitfestigkeit nur etwa 25–30 % der Kurzzeitfestigkeit beträgt. Entschärft wird das Problem allerdings zumeist wegen des vergleichsweise geringen E-Moduls von Glasfasern, aufgrund dessen die Gebrauchstauglichkeit auf einem relativ geringen Spannungsniveau massgebend wird (etwa bei Profilkonstruktionen oder FRP-Fahrbahnplatten). Besondere Beachtung hinsichtlich Spannungsrisskorrosion erfordert jedoch die Anwendung von Glasfasern in Vorspannsystemen oder als schlaffe Bewehrung bei Rissbildung im Beton.

Duktilität

FRP-Materialien verhalten sich linear-elastisch bis zum Bruch. Die unter Duktilität subsumierten Eigenschaften – mögliche Schnittkraftumlagerung sowie Vorwarnung bei Tragsicherheitsproblemen durch grosse Verformungen – sind in der Regel nicht (Kohle- und Aramidfasern) oder nur teilweise (Glasfasern) vorhanden. Bei Glasfasern spricht man (fälschlicherweise) oft von duktilem Verhalten, da die Verformungen wegen des relativ geringen E-Moduls vom Gebrauchszustand bis zum Bruch ohne weiteres um den Faktor 10 bis 20 zunehmen können. Das Verhalten bleibt jedoch linear-elastisch. Verschiedene Strategien wurden entwickelt, um annähernd duktiles Verhalten zu erhalten:
Hybride Faseranordnungen: Mischung von Kohlefasern mit kleinerer und Glasfasern mit grösserer Bruchdehnung. Beim Bruch der Kohlefasern werden die Kräfte auf die Glasfasern umgelagert, verbunden mit einer grossen Verformungszunahme. Das Verhalten wird als pseudoduktil bezeichnet.
Hybride Betonbewehrungen: Bei Beton-Fahrbahnplatten werden die oberen, korrosionsgefährdeten Bewehrungen in FRP, die unteren, geschützten konventionell in Stahl angeordnet. Dadurch wird beides, Korrosionsschutz und Duktilität, teilweise erreicht.
Bruchart: Insbesondere in Kanada wird bei FRP-bewehrtem Beton die Bruchart «Betonbruch vor FRP-Bruch» vorgeschrieben. Dadurch wird zumindest der bescheidene Beitrag des Betons zum duktilen Verhalten ausgenützt. Der dazu erforderliche Bewehrungsaufwand ist entsprechend gross.
Redundanz, Systemduktilität: Im Rahmen der Entwicklung von neuen materialgerechten Strukturkonzepten kann mit entsprechend vorhandener Redundanz und Systemduktilität die fehlende Materialduktilität zumindest teilweise kompensiert werden.
Sensorik: Durch integrierte faseroptische Sensoren, verbunden mit Fernüberwachung, kann im Weiteren eine automatische Frühwarnung bei allfälligen Tragsicherheitsproblemen erfolgen.

Anisotropie

Die vorzüglichen Eigenschaften von FRP-Materialien sind nur in Faserrichtung vorhanden. Quer zu den Fasern dominieren die Eigenschaften der schwachen Matrix. Dies kann je nach Beanspruchungsart sowohl Vor- als auch Nachteile haben: Bei konstanter Beanspruchungsrichtung können die Fasern in Beanspruchungsrichtung gelegt und in vorteilhafter Weise voll genutzt werden. Bei wechselnden Beanspruchungsrichtungen hingegen wird die Anisotropie zum Nachteil. Die erforderlichen quasi-isotropen Faserarchitekturen weisen erheblich verminderte Festigkeiten und Steifigkeiten auf. Konkret wirkt sich die Anisotropie zumeist in zwei Fällen negativ aus: im Bereich von Verbindungen und Krafteinleitungen sowie bei Schubbeanspruchung. Schubfestigkeiten und -steifigkeiten sind in der Regel gering, insbesondere dürfen Schubverformungen meist nicht vernachlässigt werden.

Schwingungsverhalten

Aufgrund der geringen Eigenlast ist dem Schwingungsverhalten entsprechende Beachtung zu schenken. Bei Glasfaserkonstruktionen werden aufgrund des E-Moduls in der Regel die Verformungen bestimmend, so dass die Schwingungsproblematik entschärft wird.

Die Materialien weisen aufgrund des Verbundcharakters zudem ein gutes Dämpfungsverhalten auf.

Brandverhalten

Die Matrices von FRP-Materialien sind grundsätzlich brennbar, wenn auch aufgrund der geringen thermischen Leitfähigkeit das Erhitzen vergleichsweise langsam vor sich geht. Der Brandeinwirkung kann durch konstruktive Massnahmen (Verankerung des Fasernetzes, Minimierung der exponierten Oberfläche etc.), redundante Strukturkonzeption oder Schutzmassnahmen begegnet werden.

Dauerhaftigkeit

Die Dauerhaftigkeit ist im Einzelfall abzuklären. In der Regel werden Kohlefasern als dauerhaft eingestuft, bei Aramidfasern ist insbesondere der UV-Empfindlichkeit und bei Glasfasern der Alkali- sowie Feuchtigkeitsempfindlichkeit Rechnung zu tragen.

Anwendungsempfehlungen

Im Sachstandsbericht sind Anwendungsempfehlungen enthalten, die auf einem einfachen, im Bericht dargelegten Beurteilungsverfahren gründen. Für die eingangs aufgeführten FRP-Bauteile ergibt sich aufgrund dessen folgende zusammenfassend wiedergegebene Einschätzung:

Lamellen zur Verstärkung

Anwendungserfahrungen bestehen seit rund 10 Jahren, Bemessungsrichtlinien stehen zur Verfügung. FRP-Lamellen sind heute zuverlässig und wirtschaftlich einsetzbar.

Gelege und Gewebe zur Verstärkung

Anwendungserfahrungen bestehen seit knapp 10 Jahren, verbreitete Bemessungsrichtlinien bestehen noch keine. Die Technologie hat sich in den USA und in Japan durchgesetzt. In Europa können Gelege und Gewebe im Rahmen von Pilotanwendungen – vor allem bei wickelbaren Bauteilen mit entsprechend problemlosen Verankerungen – zur Anwendung empfohlen werden.

FRP-Bewehrungsstäbe

Bei FRP-Bewehrungsstäben überwiegen heute in der Regel die Unsicherheiten und Nachteile die Vorteile deutlich. Bei Korrosionseinwirkungen, wie sie im Brückenbau normalerweise vorliegen (Chlorideinwirkung und Karbonatisierung), besteht bei fachgerechter konstruktiver Ausbildung grundsätzlich kein Anlass, die Stahlbewehrung zu substituieren.

FRP-Kabel

FRP-Kabel weisen langfristig ein grosses Potenzial für den Einsatz bei weit gespannten Hänge- und Schrägseilbrücken auf. Zum Erfahrungsgewinn kann heute eine externe Anwendung in geeigneten Fällen als sinnvoll eingestuft werden. Für den internen Einsatz als Betonvorspannung gelten die gleichen Bemerkungen wie für Bewehrungsstäbe.

FRP-Profile

Reine FRP-Profilbrücken werden sich nicht durchsetzen können. In Verbindung mit materialgerechten neuen Strukturkonzepten unter Einbezug von flächigen Tragelementen werden jedoch immer Profile erforderlich sein, allerdings mit materialgerechteren Querschnittsformen. Die heute kopierten Stahlquerschnitte verhalten sich sehr ungünstig.

FRP-Fahrbahnplatten

Aufgrund der namhaften Vorteile beinhalten FRP-Fahrbahnplatten mittelfristig das Potenzial, sich durchzusetzen. Die Anwendung im Rahmen von wissenschaftlich begleiteten Pilotprojekten sollte deshalb gefördert werden.

Forschungsbedarf und Ausblick

Damit Faserverbundmaterialien eine weitere Verbreitung im Brückenbau finden können, sind weiterführende Forschungs- und Entwicklungsarbeiten, insbesondere in den Bereichen materialgerechte Anwendungsformen, Dauerhaftigkeit und Langzeitverhalten, Brandverhalten, Nachhaltigkeit und Recycling sowie Ermittlung von Lifecycle-Kosten, erforderlich.
Im Oktober 2000 wurde an der ETH Lausanne das CCLab – Composite Construction Laboratory – gegründet. Das CCLab befasst sich insbesondere auch mit der Entwicklung von materialgerechten Anwendungsformen von Faserverbundmaterialien im Brückenbau in den Bereichen Instandsetzung und Verstärkung sowie hybride und All-composite-Neubauten. Einen Forschungsschwerpunkt bildet dabei die Entwicklung von unterhaltsfreien, dauerhaften und schnell montierbaren FRP-Leichtfahrbahnplatten, in erster Linie für den Ersatz von korrodierten Betonfahrbahnplatten oder für hybride Neubauten.

Prof. Dr. Thomas Keller, Composite Construction Laboratory, ETH Lausanne, EPFL-DA-CCLab / CP 555, 1001 Lausanne

Literatur

1 Keller, Thomas: Anwendung von Faserverbundmaterialien im Brückenbau, Sachstand mit Anwendungs- und Forschungsempfehlungen, Bericht Nr. 549. Eidg. Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation / Bundesamt für Strassen, 2001 (ab Sommer 2001 auch in englischer Sprache erhältlich)