

# Stahlbetonverbund-Brücke mit CFK-Spannkabeln: Rad-/Gehwegbrücke über die Kleine Emme

Autor(en): **Burkhardt, Hansjakob / Keller, Arnold / Schwegler, Gregor**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizer Ingenieur und Architekt**

Band (Jahr): **117 (1999)**

Heft 17

PDF erstellt am: **10.08.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-79722>

## **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

## **Haftungsausschluss**

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Hansjakob Burkhardt, Arnold Keller und Gregor Schwegler, Luzern

# Stahlbetonverbund-Brücke mit CFK-Spannkabeln

## Rad-/Gehwegbrücke über die Kleine Emme

**Ein schlanker einfacher Balken wurde durch zwei im Untergurtrohr verlaufende kohlenfaserverstärkte Kunststoff-Kabel (CFK-Kabel) unterspannt. Die 47 Meter lange Brücke wurde auf dem Installationsplatz im Verbund vorfabriziert, vorgespannt und als 130 t schwere Konstruktion mit einem mobilen Raupenkran versetzt.**

Für die Lücke in der Radroute von Luzern nach Rothenburg wurde eine kostengünstige und in kurzer Zeit realisierbare Überquerung der Kleinen Emme im Gebiet ihrer Mündung in die Reuss gesucht. Sieben Planungsteams konnten im Einladungsverfahren ihre Vorprojekte einreichen. Zwei Teams erhielten den Auftrag zur Weiterbearbeitung ihres Projekts. Daraus wurde Ende Oktober 1997 das nun ausgeführte Projekt zur Planaufgabe freigegeben.

Die Randbedingungen für das Brückenprojekt waren die folgenden:

- Keine Abstützung im Flussbett der Kleinen Emme während Bau oder im Endzustand (Hochwassergefahr)
- Unterhaltsarme und «vandalenfeste» Konstruktion
- Freiraum Höchsthochwasser der Kleinen Emme zu Unterkante der Brücke 1,50 m
- Baustellenzufahrt nur via SBB-Unterführung (Lichtmasse:  $B \times H = 4,0 \times 3,6$  m)

## Variantenwahl

Der beschränkte Projektwettbewerb brachte elf Variantenvorschläge von Holz-, Stahl- und Betonbrücken hervor, aus denen wegen der folgenden Gründe die ausgeführte Stahlbetonverbund-Brücke ausgewählt wurde:

- Die Variante Holzbrücke genügte den Überlegungen bezüglich Vandalismus nicht
- Weitgehende Vorfertigung und damit Reduktion der Witterungsabhängigkeit
- Beschränkte Zugangsmöglichkeit zum Installationsplatz und damit Einsatz

eines zerlegbaren grossen Raupenkrans sinnvoll

- Pilotprojekt für CFK-Vorspannkabel. Weltweit erstmaliger Einsatz dieser Kabel als Bestandteil einer Stahlbetonverbundkonstruktion
- Langfristige Überwachung der Kabel mit faseroptischen Sensoren
- Gute Einpassung in die Landschaft mit innovativem Projekt
- Wirtschaftlich günstige Gesamtlösung. Die Kosten für die Rad-/Gehwegbrücke belaufen sich auf 0,6 Mio. Franken

## Projektierung

### Entwurf

Die Lage der neuen Brücke befindet sich 50 m flussabwärts einer bestehenden Bahn-Fachwerkbrücke und 90 m vor der Betonkastenbrücke eines Autobahnzubringers. Die Brücke muss ein Hochwasser  $Q_{100}$ , das auch Vorlandflächen überflutet, mit 1,5 m Freibord auf mindestens 46 m Breite stützenfrei überspannen. Aufgrund

dieser Ausgangslage erwies sich die vorliegende Formgebung des Brückenkörpers unter einer Vielzahl von untersuchten Tragwerkstypen am vorteilhaftesten. Gründe:

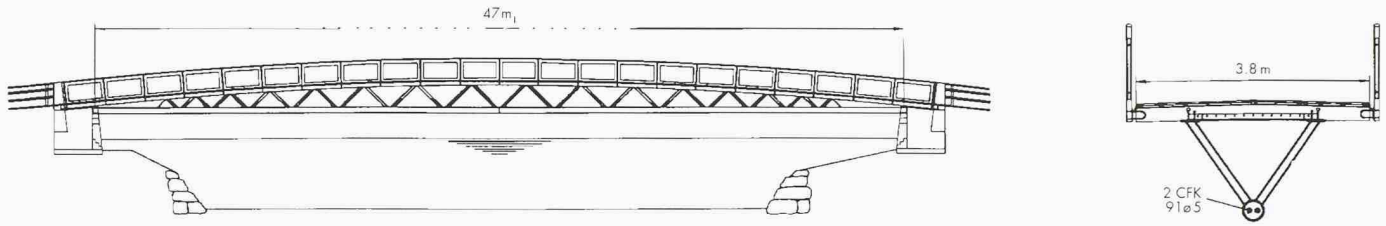
- Nur geringe Höhenverluste gegenüber einer Konstruktion mit untenliegender Fahrbahn
- Minimale Dammschüttungen für Zufahrtsrampen, weil die Widerlager in den Bereich des Gefällswendepunkts zu liegen kommen
- Einfaches, kompaktes Bauvolumen mit funktionsbetonender Form

Bei der Auflösung des einfachen Balkens (mit kurzen Endauskragungen) in seine Tragelemente erwies sich der Druckbogen mit dem Zugband als gegeben, während die Ausfachungen und Auflagerkonstruktion unzählige Variationen von Material und Form zuließen. Ein sinnvolles, ansprechendes Zusammenfügen der unterschiedlichen Teile zu finden, war für die Gestaltung entscheidend. Die Materialwahl der Tragelemente konnte der erforderlichen Funktion optimal angepasst werden:

Die massive, 22 bis 25 cm starke Betonplatte des Druckbogens trägt gleichzeitig längs sowie quer und erlaubt einen konventionellen Abdichtungs- und Belagsaufbau bis zu den Randprofilen und Geländerbefestigungen hin. Die Endauskragungen sind als einfache Verlängerungen der Betonplatte ausgeführt.

1  
Ansicht der Brücke vom nördlichen Widerlager aus





2  
Ansicht und Querschnitt

Das Zugband besteht aus einem dickwandigen Stahlrohr (355,6×30 mm) und einer innenliegenden Vorspannung. Das Untergurt-Rohr dient zudem als Schutz für die deformationsreduzierenden Vorspannkabel. Die Technik der CFK-Vorspannung wurde anlässlich der Berichterstattung über die Storchenbrücke in Winterthur (SI+A 44 vom 24. Oktober 1996) behandelt.

Die Ausfachungen sind in derselben Profilart wie der Untergurt (ROR 139,7×10 bis 16 mm) und längs wie quer V-förmig angeordnet. Während in Längsrichtung die Neigung konstant 45° beträgt, richtet sie sich quer nach der abnehmenden Höhe (65° bis 35°). Der Verbund zur Betondruckplatte wird in den oberen Fachwerkknoten über Betondruck auf Knotenbleche und Sprossen (horizontale Verbindung der Obergurtknoten mit Winkeln 200×100×12 mm) hergestellt.

Der Obergurt hat eine sekundäre Funktion, weil die Brücke mit tragender Betondruckplatte von Auflagerkasten zu Auflagerkasten auf die Widerlager versetzt wird. Das Flacheisen (FLA 300×30 mm) überträgt zusammen mit dem einbetonierten Knotenblech die Strebenkräfte. Der Obergurt wird auf seiner ganzen Länge aus

Stabilitätsgründen mit der Betonplatte verdübelt.

Die Auflagerkonstruktion übernimmt die Ausfachungsgeometrie und führt als geschlossener Kasten die Fachwerkkonstruktion mit der Auflagerscheibe zusammen. Sowohl im Montage- wie auch im Endzustand gewährleistet der Auflagerkasten den Kraftfluss aus den Brückenlagern und der exzentrischen Vorspannung in die verdübelte Betondruckplatte.

Die Lagerung des Tragwerks erfolgt vertikal über Neopren-Blöcke unter den Auskragungen der Auflagerscheiben. Die horizontale Lagerung ist in Längsrichtung schwimmend, die Deformationen sind jedoch durch den Polymerbitumen-Verguss der Betonplattenseiten und der Lager in Querrichtung bestehen aus einem speziellen Verguss der Betonplattenseiten mit den Kandelabersockeln.

Die begehbaren Widerlager sind als oben offene Betonkästen der Brückengeometrie angepasst ausgeführt. Die bis zur Schleppplattenkonstruktion führende Brückenplatte überdeckt den Widerlagerkasten. Die Tieffundation erfolgt mittels Ortbeton-Kleinbohrpfählen und dient zugleich als Kolkenschutz. Die markanten Betonsöckel stehen am Ende der Brücken-

platte. Als gestaltende Elemente halten sie die Horizontalkraftlager und ermöglichen konstruktiv überzeugende Übergänge vom Brückengeländer auf die andersartige Dammschranke. Zugleich sind sie noch Kandelabersockel und kleine Flügelmauern.

**Tragwerk**

Die Nutzung der Rad-/Gehwegbrücke ist für kleine Unterhaltsfahrzeuge (maximal 4 t) ausgelegt. Die Nutzungsdauer beträgt 80 Jahre.

Die meisten Nachweise zur Gewährleistung der Tragsicherheit und Gebrauchstauglichkeit des Tragwerks erfolgten mit Hilfe eines räumlichen Stabwerks. Dieses Modell ermöglicht insbesondere:

- separate Beton- und Stahlelemente, um zeitabhängige Materialkennwerte und differentielle Temperaturdehnungen über den hybriden Gesamtquerschnitt direkt einzuführen,
- die Verbundwirkung am Obergurtknoten unter verschiedenen Randbedingungen zu betrachten und
- die Gesamt- und Elementstabilität nach der Eigenwert-Methode mit schlankheitsabhängigem zusätzlichem Sicherheitsfaktor zu überprüfen.

3  
Spannstuhl auf Auflagerscheiben beim Vorspannen der CFK-Kabel

**Technische Daten**

Brückenkonstruktion:	Stahlbetonverbund-Brücke V-Bogenfachwerk mit Endkasten	
Brückenabmessungen:	Spannweite:	47 m
	Breite:	3,8 m
	Länge:	51 m
Eigenlasten:	Stahl:	33 t
	Während Montage:	130 t
	Nach Fertigstellung:	200 t
Spannkabel:	2 BBR Carbon External à je 91 CFK-Drähte ø 5 mm	
	Bruchlast $V_u$ :	4300 kN
	Vorspannkraft $V_0$ (55%):	2360 kN
	Mobiler Raupenkran:	Liebherr C 5000
	Gewicht:	450 t + 250 t Superlift
	Auslegerlänge:	14 bis 133 m
	Tragkraft:	250 t bei Radius 20 m



Die Dimensionen aus der Hand-Vorbemessung wurden bestätigt. Die rechnerische Vorspannkraft wurde infolge der Zeit- und Temperaturabhängigkeit mit Grenzwerten  $V_{\max} = 2V_o = 4800 \text{ kN}$  und  $V_{\min} = 4300 \text{ kN}$  festgelegt. Dabei beeinflussen Schwinden und Kriechen des Betons diese Untergurtvorspannung der Verbundkonstruktion nur über Deformationen 2. Ordnung. Da die Initialvorspannung im Herbst erfolgte, konnte sie auf  $V_{\max}$  festgesetzt werden. Bis zum Wiederanstiegen der Tagesmitteltemperaturen wird das Kriechen im Kabelkonus grossenteils abgeklungen sein.

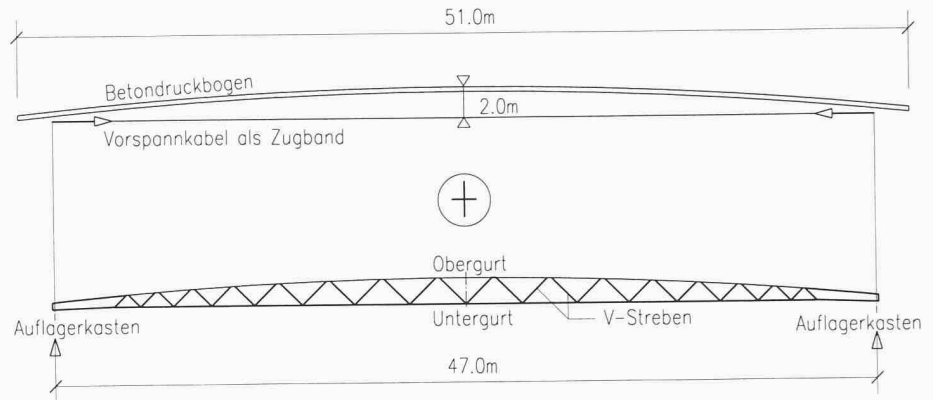
Als aussergewöhnliche Einwirkung mit entsprechender Sicherheitsreduktion ist der Ausfall beider Kabel unter ständigen Lasten ( $\psi = 1$ ) berücksichtigt.

Der Dynamik des schlanken Tragwerks wurde von der Vorprojektphase an grosse Aufmerksamkeit geschenkt, da für den Fussgänger keine unangenehm wahrnehmbaren Schwingungen entstehen dürfen. Für die Grundschwingungen war eine tiefe Abstimmung unter 1,6 Hz und für die ersten Oberschwingungen eine hohe über 4,5 Hz vorgesehen. Die Rechnung zeigte genügend tiefe Grundfrequenzen (längs, vertikal und quer), während für die energieärmeren Oberfrequenzen ohne Berücksichtigung von Trägheit und Dämpfung eine Resonanz möglich war. Vorsichtshalber wurden zwei Schwingungstilger eingeplant. Spätestens nach dem Belagseinbau und dem Fugenverguss war jedoch klar, dass die Anregung der Oberschwingungen auf ein kaum mehr spürbares Mass gedämpft wird.

Die Dauerhaftigkeit der Tragelemente ist durch konstruktive Massnahmen gewährleistet. So sind die Stahlteile durch die Betonplatte vor Bewitterung geschützt, wobei der Korrosionsschutz als Verschleissmittel Unterhalt benötigt. Die Betonplatte wiederum ist vollflächig bis zu den seitlichen Randprofilen (mit Wetterschnecken) durch Polymerbitumendichtungsbahnen abgedeckt und mit einem zweischichtigen Gussasphaltbelag versehen. Die Fahrbahnübergänge sind als Joint-Verbindung mit Polymerbitumen vergossen

#### Planungs- und Ausführungstermine

Beschränkter Projektwettbewerb,  
Einladungsverfahren 1. Stufe  
Projektwettbewerb 2. Stufe  
Planaufgabe  
Submission  
Auftrag an Gesamtunternehmer  
Baubeginn  
Antransport Stahlkonstruktion  
Versetzen der Brücke  
Offizielle Eröffnung



4  
Einfacher Balken in zwei Systeme aufgelöst

und werden mit Belag und Abdichtung zusammen unterhalten.

#### Ausführung

##### Submission

Die Ausführung der Bauarbeiten wurde im Rahmen einer Gesamtunternehmerofferte ausgeschrieben und an einen Hauptunternehmer vergeben. Diesem oblag es, sämtliche Teilarbeiten und Subunternehmerleistungen zu koordinieren.

##### Bauvorgang

Basierend auf den Projektvorgaben mussten zunächst die Werkstattpläne für die Fertigung des Stahlrohrfachwerks erstellt werden. Dank des modernen CAD-Systems konnte die anspruchsvolle, dreidimensionale Geometrie der insgesamt 650 Einzelteile passgenau bestimmt werden. Der Zuschnitt der Diagonalrohre erfolgte mit einer elektronisch 4-fach gesteuerten Brennanlage millimetergenau mit differenzierter Schweissnahtvorbereitung auf der ganzen Mantelfläche. Die beiden Tragwerkshälften wurden im Konstruktionswerk zusammengeschweisst. Dazu waren rund 4500 m, zur Hälfte ultraschallgeprüfte Schweissnähte erforderlich.

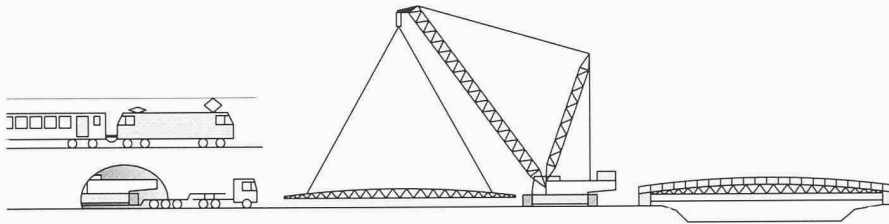
Nach dem Aufbringen des dreischichtigen Korrosionsschutzes wurden die beiden knapp 24 m langen Brückenteile mit Tiefganglastwagen angeliefert und auf einer vorbereiteten Montagelehre zusammengesetzt.

Nun konnte die Brückenuntersicht eingeschalt, die Armierung verlegt und die Fahrbahnplatte bis zu den Auflagerkästen betoniert werden. Diese Auflast erlaubte schon auf dem Montageplatz eine volle Vorspannung mit den beiden im Untergurt eingeführten CFK-Kabeln.

Das Versetzen der nun 130 t schweren und 47 m langen Brücke über den Lauf der Kleinen Emme in die vorgängig erstellten Widerlager erfolgte mit dem grössten in der Schweiz verfügbaren Raupenkran



5  
Montage mit Raupenkran



6

Anlieferung durch Bahnunterführung und Montage der fertigen Brückenkonstruktion

(Kasten mit technischen Daten). Zerlegt in 35 Transporteinheiten war seine Installation bei den für grosse Pneukrane zu engen Zufahrtsverhältnissen vorteilhaft und ermöglichte die präzise und praktisch erschütterungsfreie Montage der Brückenkonstruktion.

Anschließend wurden die Fahrbahnkonstruktion im Bereich der Widerlager noch ergänzt und die bituminöse Brückenabdichtung und der Gussasphaltbelag eingebracht.

### Kontrollen

Nebst den üblichen vermessungs- und materialtechnischen Überprüfungen wurde das Hauptaugenmerk auf die Überwachung der CFK-Kabel gelegt. Erstmals werden Dehnungen und Temperatur über Glasfaserkabel gemessen, die in den CFK-Drähten zentrisch eingebettet sind. Im weiteren werden auch noch elektrische Messungen vorgenommen. Das Monitoring wird weiter unten in einem separaten Beitrag behandelt.

### Am Bau Beteiligte

Bauherrschaft:  
Verkehrs- und Tiefbauamt Kanton Luzern  
Projekt und Bauleitung:  
Plüss + Meyer Bauingenieure AG, Luzern  
Gestalterische Mitwirkung:  
Galliker und Geissbühler, Architekten, Luzern  
Hauptunternehmer:  
Gebr. Wüest, AG, Luzern  
Stahlbau-Subunternehmer:  
Senn AG, Oftringen  
CFK-Vorspannung:  
Arbeitsgemeinschaft BBR-Empa, Dübendorf  
Draht-Lieferant:  
Stesalit AG, Zullwil  
Monitoring:  
Empa, Dübendorf  
Brückenmontage:  
Fanger AG, Sachseln

### Adressen der Verfasser:

*Hansjakob Burkhardt*, dipl. Bauing. ETH, Baudepartement des Kantons Luzern, VTA, Arsenalstrasse 43, 6010 Kriens, *Arnold Keller*, dipl. Bauing. ETH/SIA, *Gregor Schwegler*, dipl. Bauing. ETH/SIA, Dr. sc. techn., Plüss + Meyer Bauingenieure AG, Landenbergstr. 34, 6005 Luzern (A. Keller seit April 1999: Schmiedgasse 24, 6370 Stans)

Rolf Brönnimann, Peter Anderegge und Philipp M. Nellen, Dübendorf

## Monitoring der CFK-Kabel der Brücke über die Kleine Emme

**Für die neue Rad- und Gehwegbrücke über die Kleine Emme wurden zwei CFK-Spannkabel verwendet. Um diese Kabel, die unter hohen Lasten stehen, zu überwachen, wurden neben konventionellen hauptsächlich faseroptische Bragg-Gitter-Sensoren eingebaut. Die Fragestellungen im Zusammenhang mit der Anwendung faseroptischer Überwachungssysteme sowie Messresultate werden diskutiert.**

1996 wurden als Weltpremiere bei der Storchenbrücke in Winterthur, einer Schrägseilbrücke [1], zwei Lastkabel aus kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff (CFK) eingesetzt. Last, Kabeleinzug, Temperatur und Feuchte dieser Kabel werden seither permanent überwacht. Auch bei diesen Kabeln kamen schon faseroptische Sensoren zum Einsatz. Deren Daten werden in unregelmässigen Abständen ausgelesen. Sie funktionieren seit bald drei Jahren pro-

blemlos, und die Resultate stimmen hervorragend mit den Messungen der elektrischen Dehnungsmessstreifen überein.

Bei der neuen Brücke über die Kleine Emme kommen zwei CFK-Kabel als Vorspannkabel zum Einsatz. Die Kabeldehnung ist jedoch mehr als fünfmal höher als bei der Storchenbrücke. Dies stellt eine grosse Anforderung an die Befestigungstechnik und Dauerhaftigkeit der Sensoren dar. Im Labor wurden deshalb umfangrei-

che Tests durchgeführt, um die Brauchbarkeit der Fasern als Messmittel für Überwachungsaufgaben im Brückenbau nachzuweisen.

### Optische Faser-Bragg-Gitter als Sensoren

Bild 1 zeigt den typischen Aufbau einer optischen Faser. Sie besteht aus Quarz und hat einen Querschnitt mit einem Durchmesser um die 0,1 mm. Die Faser besteht aus zwei Zonen, dem Kern und dem Mantel. Zum mechanischen Schutz wird die Faser mit einem Kunststoffmantel umhüllt. Durch Dotierung des Kerns mit Germa-

1 Dargestellt ist eine optische Faser mit eingeschriebenem Bragg-Gitter. Das Gitter reflektiert von der eingestrahlichten breitbandigen Lichtquelle nur die Bragg-Wellenlänge

