

«Veredeln» als Ingenieurkonzept in der Denkmalpflege von Brücken

Eugen Brühwiler

Prof. Dr. dipl. Ing. ETH/SIA/IVBH, Professor und Inhaber des Lehrstuhls für Bauwerkserhaltung an der ETH Lausanne (EPFL)

1. Fragestellung und Zielformulierung

Engineering im Bestand will die Prinzipien der Nachhaltigkeit umsetzen, indem das vorhandene Leistungsvermögen einer Brücke mit einer vertieften und präzisen Überprüfung ermittelt und auch ausgeschöpft wird, falls dies die zukünftige Nutzung erfordert. Das Ziel besteht darin, die bestehende Bausubstanz einer Brücke auszunutzen und zu ergänzen, um auf neue Nutzungsanforderungen und Bedürfnisse wirtschaftlich, umweltschonend und sozialverträglich reagieren zu können.

Beim Umgang mit Brücken sind somit neben technischen und wirtschaftlichen Kriterien auch die Anforderungen der Denkmalpflege und damit die Bewahrung von kulturellen Werten mit einzubeziehen. Die bestehende Brücke soll dadurch eine nächste lange Nutzungsdauer von mehr als 50 Jahren erhalten. Dieses Ingenieurkonzept wird in diesem Aufsatz als *Veredeln* bezeichnet.

Das *Veredeln* als Ingenieurkonzept beinhaltet zwei grundlegende Zielvorgaben:

- Das *Weiternutzen* beinhaltet die unveränderte Nutzung der bestehenden Brücke unter Ausführung der üblichen Überwachung und der geplanten Unterhaltsarbeiten. Neuartige Ingenieurmethoden ermöglichen zu zeigen, dass mehr Tragvermögen und damit eine höhere Leistungsfähigkeit im Brückentragwerk vorhanden ist, als bisher unter Verwendung traditioneller Ingenieurmethoden vermutet wurde.
- Das *Weiterbauen* beinhaltet bauliche Eingriffe zur Anpassung oder Erweiterung einer bestehenden Brücke, um neue Nutzungsanforderungen zu erfüllen. Bauliche Eingriffe sind möglichst wenig invasiv zu gestalten, sodass sie nicht oder kaum erkennbar sind. Um dieses Ziel zu erreichen, sind hochleistungsfähige Baustoffe zweckmäßig, die bei einem minimalen Mengeneinsatz ein möglichst großes Tragvermögen ermöglichen.

Das *Veredeln* soll den Anforderungen der Denkmalpflege genügen, indem die bestehende Bausubstanz weitgehend oder ganz erhalten bleibt. Auf die Notwendigkeit einer baulichen Anpassung oder Erweiterung der bestehenden Brücke soll mit möglichst sanften Eingriffen reagiert werden, die nicht oder kaum erkennbar sind.

2. Weiternutzen

2.1 Grundsatz

Eine Brücke ist ein technisches Objekt und kann so lange genutzt werden, wie ihr Zustand, ihr Tragvermögen und eine wirtschaftliche Erhaltung dies ermöglichen. Ein Bauwerk ist kein Lebewesen und hat somit auch kein «Ende einer Lebensdauer». Folglich sind das Alter und die Konstruktionsart einer Brücke allein keine hinreichenden Kriterien für einen Abriss einer Brücke.

Die Herausforderung für den Ingenieur besteht darin, die Aufgabenstellungen mit technisch effizienten, neuartigen Lösungen zu lösen. Diese Aufgabenstellungen lauten oft:

- Kann eine bestehende Brücke in Zukunft mit höheren Verkehrslasten und einer stärkeren Verkehrsmenge befahren werden? Kann das bestehende Brückentragwerk stärker beansprucht werden?

- Falls das Tragvermögen für höhere, statische Verkehrslasten genügend ist, kann das Brückentragwerk auch eine größere Verkehrsmenge und die damit zusammenhängenden, sich wiederholenden Beanspruchungen ertragen? Ist die Ermüdungssicherheit für künftige Verkehrslasten unter Berücksichtigung der in der Vergangenheit bereits erfolgten Ermüdungsbeanspruchung genügend?

Die Vorgehensweise zur Beantwortung dieser Fragen basiert darauf, an einer Brücke detaillierte Informationen zu sammeln und damit möglichst präzise Daten für die Nachweise des statischen Tragvermögens und für das Ermüdungsverhalten aufzubereiten. Mit diesen Daten ist danach zu zeigen, dass unter Einhaltung der Sicherheitsanforderungen gemäß den Baunormen die bestehende Brücke durch Ausnutzen von Tragreserven höher beansprucht werden kann, ohne dass Verstärkungen ausgeführt werden müssen.

Nachfolgend wird der Nachweis einer genügenden Ermüdungssicherheit von genieteten Stahlbrücken für Bahnverkehr erörtert. Dazu dienen drei Bahnbrücken exemplarisch als Fallbeispiele.

2.2 Monitoring-basierter Ermüdungsnachweis von genieteten Stahlbrücken

Bahnbrücken werden durch heutigen und künftig vorgesehenen Bahnverkehr oft stärker beansprucht als in der Vergangenheit. Entsprechend wird der Nachweis eines genügenden Tragvermögens der Brücke anspruchsvoll. Rechnerische Nachweise, sogenannte *Nachrechnungen* unter Verwendung traditioneller Vorgaben der Baunormen, führen in der Regel zu einem negativen Ergebnis, auch für Brücken, die sich im Betrieb normal verhalten und bewähren. Dies ist auf konservative Lastmodelle zurückzuführen, welche die wirklichen Verkehrslasten nur ungenau abbilden.

Die neuartige Nachweismethodik besteht darin, die im Brückentragwerk auftretenden Beanspruchungen messtechnisch zu erfassen. Damit können die wirklich auftretenden Spannungen zuverlässig und präzise erfasst werden. Die drei genieteten Stahlbrücken gemäß den Abbildungen 1 bis 3 wurden mit Messsensoren ausgerüstet, um die Beanspruchungen der maßgebenden, genieteten Konstruktionsteile infolge der Zugsüberfahrten während einer Zeitdauer von mehr als 12 Monaten aufzunehmen.

Die Messwerte wurden ausgewertet, um die Größe der Spannung (Beanspruchung) und Anzahl Spannungswechsel in den genieteten Konstruktionsdetails infolge der Zugsüberfahrten zu bestimmen. Je nach Größe der Achslast und der Anordnung Achsen die einen Zug zusammensetzen ergeben sich unterschiedliche Spannungswerte. Dabei führen beispielsweise die Lokomotiven und die Achslasten von voll beladenen Güterwagen zu hohen Spannungswerten, während die Personenwagen geringere Spannungen im Brückentragwerk erzeugen. Nicht immer kann in den maßgebenden Messquerschnitten gemessen werden, weil die Zugänglichkeit nicht gegeben ist. Diese Messquerschnitte werden mit einem verfeinerten Tragwerksmodell rechnerisch erfasst unter Verwendung der Messwerte, die der Eichung des Rechenmodells dienen.

Bei hoch frequentierten Bahnlinien mit beispielsweise 250 Zügen pro Tag und Gleis, ergeben sich bereits nach 60 Jahren etwa 100 Millionen Spannungswechsel, die für das Ermüdungsverhalten bedeutend sind. Die Ermüdungsfestigkeit der verschiedenen, genieteten Konstruktionsdetails einer Bahnbrücke ist aufgrund von experimentellen Forschungsarbeiten seit 50 Jahren gut bekannt. Es konnte nachgewiesen werden, dass eine Ermüdungsdauerfestigkeit vorliegt, d.h. das Nietdetail kann mit einer unendlich hohen Spannungswechselzahl beansprucht werden ohne zu brechen, falls die Größe der Beanspruchung kleiner ist als die Ermüdungsdauerfestigkeit. Nur bei Ermüdungsspannungen, die grösser sind als diese Ermüdungsdauerfestigkeit, können Ermüdungsrisse in den Nietdetails auftreten, die zu einem Ermüdungsbruch führen können.

Genietete Bahnbrücken sind in der Regel seit mehr als 100 Jahren in Betrieb, und sie haben während der bisherigen Nutzung durch Zugsüberfahrten bereits eine sehr hohe Spannungswechselzahl erfahren. Da bei diesen Brücken keine Ermüdungsrisse festgestellt wurden, kann gefolgert werden, dass diese Brücken mit Ermüdungsspannungen beansprucht worden sind, die kleiner waren als die Ermüdungsdauerfestigkeit. Mit einem messtechnischen Monitoring der maßgebenden Nietdetails ist

somit nachzuweisen, dass die maximalen gemessenen Ermüdungsspannungen kleiner sind als die Ermüdungsdauerfestigkeit der Nietdetails.

Bei den drei Beispielen gemäß den Abbildungen 1 bis 3 wurden maximale Spannungswerten in den ermüdungsrelevanten Nietdetails gemessen, die kleiner sind als die Ermüdungsdauerfestigkeit. Daraus durfte gefolgert werden, dass eine Ermüdungsschädigung in den maßgebenden Nietdetails auch nach mehr als 120 Jahren Nutzungsdauer sehr unwahrscheinlich ist.

Zudem konnte auf der Basis der Messwerte eine gewisse Tragreserve gegenüber der Ermüdungsdauerfestigkeit ausgewiesen werden, sodass auch eine allfällig höhere Beanspruchung durch künftig verkehrende, schwerere Züge noch aufgenommen werden kann.

Durch den Monitoring-basierten Nachweis bekommt die genietete Stahlbrücke eine nächste, lange Nutzungsdauer. Der Kostenaufwand für das Monitoring der Ermüdungsspannungen beträgt einen Bruchteil der Kosten, die das Szenario eines Ersatzneubaus verursachen würde, das gemäß traditionellen Ingenieurmethode das wahrscheinlichste Szenario ergäbe.

3. Weiterbauen

3.1 Grundsatz

Erst wenn alle Methoden und Technologien der präzisen Erfassung des effektiven Leistungsvermögens einer Brücke ausgeschöpft sind und die Anforderungen einer künftigen Nutzung vom vorhandenen Tragvermögen dennoch nicht erfüllt werden können, kommt es zu Eingriffen in die Bausubstanz der Brücke. Zudem führen neue Nutzungsanforderungen wie die Verbreiterung der Fahrbahn oder eine geänderte Nutzungsart zu baulichen Eingriffen und damit zu einer Veränderung der originalen Brücke.

Gerade bei Betonbrücken führen frühzeitig auftretende Schäden zu einem Bedarf zur Wiederherstellung der Dauerhaftigkeit der Brückenkonstruktion durch eine Instandsetzung. Zudem können Risikoanalysen in Zusammenhang mit außergewöhnlichen Einwirkungen wie Entgleisung, Anprall, Hochwasser oder Erdbeben ebenfalls bauliche Maßnahmen erforderlich machen.

Das Ziel des *Weiterbauens* besteht darin, die Eingriffsstärke möglichst zu begrenzen. Dazu sind neue Technologien mit Hochleistungsbaustoffen oft zielführend, denn seit jeher haben neuartige Baustoffe zu Fortschritten geführt. Die unter dem Begriff *Sanierung* subsummierten, tradierten Methoden, z.B. unter Verwendung von Beton, der traditionellen Methoden sind in der Regel nicht effektiv.

Technologien mit Hochleistungsbaustoffen betreffen den Einsatz von Spannsystemen mit Spannstahl oder Carbonfasern sowie hochfeste Stahlstangen, mit denen eine zusätzliche Bewehrung des Tragwerks realisiert werden kann. Seit bald 30 Jahren werden Lamellen mit Carbonfasern als zusätzliche Bewehrung eingesetzt, und neuerdings steht auch Carbonbeton beispielsweise für die Verstärkung von flächigen Tragwerken wie Gewölbe zur Verfügung.

Nachfolgend wird beispielhaft die neuartige UHFB-Technologie zur Instandsetzung und Verstärkung von Brücken vorgestellt.

3.2 Instandsetzung und Verstärkung von Betonbrücken mit Hilfe der UHFB-Technologie

Eine der wichtigsten Aufgaben des konstruktiven Ingenieurbaus ist die Entwicklung von neuartigen Technologien zur Verbesserung bestehender Betonbauten, um deren Nutzungsdauer zu verlängern und sie für größere Nutzlasten zu verstärken. In den letzten zwanzig Jahren wurden zementgebundene Ultra-Hochleistungs-Faserverbund-Baustoffe (UHFB) entwickelt. UHFB besteht aus einem zementgebunden, kompaktem Gefüge aus Partikeln und feinsten Quarzkörnern, welches durch eine sehr große Menge von etwa 15mm kurzen, schlanken Stahlfasern hochfest und verformungsfähig gemacht wird. UHFB ist wasserdicht, und die Festigkeit ist vergleichsweise hoch. Das Tragvermögen wird durch die Einlage von Bewehrungsstäben in den UHFB weiter erhöht. Damit steht ein hochleistungsfähiger Verbundbaustoff zur Verfügung.

Die grundlegende Idee der UHFB-Technologie zur Instandsetzung und Verstärkung von Betonbauten besteht darin, Bauteile aus Stahlbeton mit einer Schicht UHFB gezielt zu «härten», um stark exponierte Oberflächen zu schützen und die Tragfähigkeit statisch stark beanspruchter Bauteile zu erhöhen. Dadurch verbessert der UHFB das Tragvermögen und die Dauerhaftigkeit der originalen Betonbaute. Durch den Einsatz von UHFB wird das ursprüngliche Betonbauwerk *veredelt* und erhält einen Mehrwert, der eine nächste, lange Nutzungsdauer ermöglicht. Die UHFB-Technologie wird in der Schweiz seit 15 Jahren zur Instandsetzung und Verstärkung bestehender Infrastrukturbauwerke wie Brücken eingesetzt.

Die *Guillermaux Brücke* im Städtchen Payerne in der Schweiz wurde 1920/21 in Betonbauweise gebaut (Abb. 4). Das primäre Tragwerk der Brücke aus damaligem Eisenbeton bestand aus einem Drei-Gelenk-Bogen mit Gelenken am Bogenscheitel und an den beiden Widerlagern. Bei einer Bogenspannweite von 27.6m und einer Scheitelhöhe von nur 2.8m ergibt sich eine Schlankheit von 1:10 des flachen, 0.65m dicken und 8.2m breiten Bogens.

Die mit Verzierungen versehenen Brüstungen und die vier Obeliske an den Brückenden, die vom damaligen Stadtarchitekten Louis Bosset (1880-1950) entworfen wurden, sowie der flache Bogen bestimmen die Ästhetik der Brücke. Der Ingenieur dieser Brücke ist nicht bekannt. Obwohl diese Betonbrücke aus der Frühzeit des Eisenbetonbaus in Kontrast zu den schlanken und statisch raffiniert konzipierten Betonbrücken von Robert Maillart steht, sind die kulturellen Werte bedeutend. Das Objekt befindet sich im Inventar schützenswerter Bauwerke.

Die Eisenbetonkonstruktion wies Schäden auf und hatte eine ungenügende Tragfähigkeit. Im Jahre 2015 wurde die Brücke im Hinblick auf eine nächste lange Nutzungsdauer ertüchtigt. Die Konzeptidee der eingesetzten UHFB-Technologie bestand darin, die Tragfähigkeit der Brücke zu erhöhen, indem (1) das Scheitelgelenk des Bogens blockiert und (2) eine 50mm starke, mit Betonstahl bewehrte UHFB-Schicht unter der Fahrbahn eingebaut wurde, die als Zuggurt in Brückenlängsrichtung wirkt. Dieser UHFB-Zuggurt wurde an den Brückenden befestigt.

Diese von außen nicht sichtbare Änderung des statischen Systems führte zu einer bedeutenden Erhöhung der Steifigkeit und des Tragvermögens der Brücke. Gegenüber dem ursprünglichen statischen System konnte so das Tragvermögen beinahe verdoppelt werden. Zusätzlich dient die UHFB-Schicht als Abdichtungsschicht und schützt so, sozusagen als «dichtes Dach», den darunterliegenden Eisenbeton vor einem direkten Kontakt mit Wasser und Tausalzen. Dadurch wird die Dauerhaftigkeit der Brücke wiederhergestellt und verbessert.

Die Brüstungen mit den Verzierungen sowie die Obeliske wurden Denkmal-gerecht restauriert und mit einem hydrophobierenden Oberflächenschutz vor Wassereintritt geschützt. Auf den vier Obelisken wurden die ursprünglichen Beleuchtungskörper wieder aufgesetzt, und neu wurde eine Beleuchtung der Gehwegflächen und der Verzierungen in den Brüstungen angebracht.

Die Arbeiten wurden 2015 ausgeführt. Die Baukosten betragen 60% der geschätzten Kosten für einen Ersatzneubau. Die bald 100-jährige Brücke ist nun, ähnlich wie eine neuwertige Brücke, genügend leistungsfähig für eine nächste lange Nutzungsdauer.

Die bisher größte Anwendung der UHFB-Technologie betraf 2014/15 die *Chillon-Viadukte* der Autobahn entlang des Genfersees bei Montreux (Abb. 5). Das Schloss Chillon am Ufer des Genfersees gehört zu den wichtigsten und beliebtesten Denkmälern der Schweiz. In den 1960er Jahren wurde hier ein Teilstück der Schweizer Autobahnen gebaut. Aufgrund der gegebenen Topografie wurde zunächst ein Tunnel geplant. Aus Kostengründen wurde schließlich ein Viadukt gebaut, das aus einem Wettbewerb hervorging.

Das ausgeführte Projekt überzeugte nicht nur aus ökonomischen und technischen Gründen, sondern auch hinsichtlich einer harmonischen Einpassung in die Landschaft mit dem Schloss. Die Zahl der Doppelstützen des Viadukts wurde auf ein Minimum reduziert, was Spannweiten von 104m ergab. Die beiden Viadukte wurden soweit wie möglich von der Landschaft abgesetzt und entsprechend der Hanglage versetzt. Dies führte zu einem schlanken und leicht wirkenden Bauwerk, das sich elegant der

gegebenen Topografie entlang schwingt. Die Chillon-Viadukte gehören zu den bedeutendsten Zeugen aus der Zeit des Autobahnbaus und sind entsprechend als Bauwerke der modernen Architektur im Inventar schützenswerter Bauten aufgeführt.

Nach rund 40 Jahren Betriebsdauer wies die Spannbetonkonstruktion die üblichen Betonschäden auf und das Tragvermögen war ungenügend im Hinblick auf künftige Straßenlasten. Die UHFB-Variante erwies sich als die am wenigsten invasive und kostengünstigste Variante und wurde ausgeführt. Die Fahrbahnplatte der 2'100m langen Spannbetonkonstruktion wurde mit einer 50 mm dicken Schicht aus bewehrtem UHFB verstärkt. Dadurch wurden das Tragvermögen der Fahrbahnplatte in Querrichtung und des Brückenträgers in Längsrichtung deutlich erhöht. Zudem wird die Stahlbetonplatte der Fahrbahn mit der UHFB-Schicht abgedichtet. Die für die beiden Viadukte notwendige UHFB-Menge von je 1'240 m³ wurde im Sommer 2014 und 2015 auf der Baustelle in einer vollautomatischen UHFB-Zentrale hergestellt und in nur je fünf Wochen mit einer speziell entwickelten Einbaumaschine verbaut (Abb. 6).

Die Chillon-Viadukte sind nun mit einem von außen nicht sichtbaren Eingriff veredelt worden im Hinblick auf eine zweite, lange Nutzungsdauer. Eine der wichtigsten Kunstbaute des Autobahnbaus in der Schweiz bleibt so im originalen Erscheinungsbild erhalten.

4. Folgerungen

Bürgerinitiativen zur Rettung von Brücken von hohem Denkmalwert sind begrüßenswert, doch sie zeigen Mängel und eine gewisse Hilflosigkeit des traditionellen Ingenieurvorgehens und ungenügende Regelwerke auf, welche den Ansprüchen der heutigen Gesellschaft nicht mehr genügen.

Anhand von Beispielen erläutert dieser Aufsatz das *Veredeln* von Brücken als grundlegendes Ingenieurkonzept. Das messtechnische Monitoring einer Brücke ist eine Technologie, die eine präzise Erfassung der Leistungsfähigkeit einer bestehenden Brücke ermöglicht mit der Zielvorgabe *Weiternutzen*. Beim *Weiterbauen* erfolgen die baulichen Eingriffe in die originale Bausubstanz möglichst sanft und baukostengünstig. Dazu stehen neuartige Technologien und Hochleistungsbaustoffe zur Verfügung. Die *Veredelung* von Betonbauwerken mit dem Hochleistungsbaustoff UHFB ermöglicht einen technisch effizienten, diskreten Eingriff in die Bausubstanz.

Das *Veredeln* als Ingenieurkonzept erfüllt somit neben den technischen und wirtschaftlichen Anforderungen auch die Anforderungen der Denkmalpflege. Zudem ist das Ingenieurkonzept hinsichtlich der Nachhaltigkeit bedeutend, da bereits verbaute und genutzte Baustoff-Ressourcen weiterverwendet werden. Demgegenüber ist das heute noch übliche *Abriss-Ersatzneubauen* hinsichtlich der Nachhaltigkeit problematisch. Das *Veredeln* von Betonbauten mit der UHFB-Technologie ist somit im Sinne eines haushälterischen Umgangs mit Ressourcen nicht nur sinnvoll, sondern auch notwendig.

Die vorgestellten Methoden und Technologien basieren auf einer grundlegenden Kenntnis der Geschichte des konstruktiven Ingenieurbaus. Vom Ingenieur werden hochwertige Leistungen abverlangt, denn Kreativität und Innovationsfreude werden herausgefordert. Motivierende und dankbare Projekte sind der Gewinn und die Belohnung für den Ingenieur.

5. Literaturangaben

Technisch-wissenschaftliche Publikationen des Autors in deutscher Sprache:

Brühwiler, E., Denarié, E., Stahl-UHFB – Stahlbeton Verbundbauweise zur Verstärkung von bestehenden Stahlbetonbauteilen mit Ultra-Hochleistungs-Faserbeton (UHFB), Beton- und Stahlbetonbau 108 (2013), Heft 4, S.216-226.

Brühwiler, E., Grundsätze der Denkmalpflege bei Bahnbrücken, in „Schweizer Bahnbrücken“ (Architektur- und Technikgeschichte der Eisenbahnen in der Schweiz, Band 5), Verlag Scheidegger & Spiess, 2013, S.215-220.

Meyer, C., Bosshard, M., Brühwiler, E., Nachweis der Ermüdungssicherheit von Brücken – Teil 1: Veranlassung, Ziel und Messkonzept des Monitoring-Projekts „Bahnbrücke Eglisau“, Stahlbau 81, Heft 7, 2012, S. 504-509.

Bosshard, M., Steck, P., Meyer, C., Brühwiler, E., Tschumi, M., Haldimann, S., Ermüdungssicherheit von Brücken – Teil 2: Nachweis basierend auf den Messwerten des Monitoring-Projekts „Bahnbrücke Eglisau“, Stahlbau 81, Heft 11, 2012, S. 868-874.

Brühwiler, E., Neuartiger Umgang mit genieteten Bahnbrücken, Der Eisenbahningenieur, Nr. 2, 2012, S. 10-13.

Brühwiler, E., Hirt, M.A., Umgang mit genieteten Bahnbrücken, Stahlbau, Nr. 79, Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH Berlin, März 2010, pp. 209-219.

Brühwiler, E., Hirt, M.A.: Das Ermüdungsverhalten genieteter Brückenbauteile. Stahlbau, Nr. 56, 1987, S. 1-9.

Abbildungen und Legenden

a)



b)



Abb. 1: Bahnbrücke über den Rhein bei Eglisau (Schweiz), 90m gespannte Flussbrücke in genieteter Stahlbauweise, Baujahr 1896.



Abb. 2: Bahnbrücke über die Kander bei Wimmis (Schweiz), genietete Stahlkonstruktion, Baujahr 1897.



Abb. 3: Strassenunterführung des Wipkingerviadukts in Zürich (Schweiz), genietete Stahlkonstruktion, Baujahr 1896; Monitoring von Messwerten auf dem Smart Phone.



Abb. 4: Guillermiauxbrücke in Payerne (Schweiz), Baujahr 1920.



Abb. 5: Schloss Chillon und Chillon-Autobahnviadukte (Baujahr 1969) entlang des Genfersees (Schweiz).



Abb. 6: Chillon-Viadukte: Maschineller Einbau des Frisch-UHFB

Quellenangabe:

Fotos 1a, 2, 4a/b, 5, 6: Eugen Brühwiler

Fotos 1b und 3: Philippe Schiltz