

Strassenviadukt von Birchli-Einsiedeln über den Sihlsee nach Willerzell

Generelle Überprüfung des heutigen Zustands und Strategien für die künftige Nutzung des Viadukts



Willerzeller-Viadukt (Fotos: EB/6.05.2017)

Verfasser: Eugen Brühwiler, Prof. Dr. dipl. Bauing. ETH/SIA/IABSE
Professor an der ETH Lausanne (EPFL)
EPFL-ENAC-MCS, Station 18, 1015 Lausanne

Bericht-Nr.: E16/09 (Umfang: 21 Seiten)
Datum: 6. Juni 2017

Inhaltsverzeichnis:

0	Zusammenfassung	3
1	Ausgangslage	4
1.1	Bau des Etzelwerks	4
1.2	Volkswirtschaftliche Bedeutung des Willerzeller-Viadukts	5
2	Zielsetzung: Weshalb dieses informelle Gutachten ?.....	5
3	Brückenbautechnische Überprüfung und kulturelle Bewertung.....	6
3.1	Beschreibung der Viaduktkonstruktion	6
3.2	Bewertung der kulturellen Werte des Viadukts	7
3.3	Generelle Überprüfung der Viaduktkonstruktion	10
3.3.1	Zustandsbeurteilung	10
3.3.2	Gebrauchstauglichkeit	13
3.3.3	Tragsicherheit	13
3.3.4	Nutzersicherheit	13
3.4	Folgerungen und Empfehlungen	14
4	Erhaltungsmassnahmen	15
4.1	Grundsätzliches	15
4.2	Anforderungen für die künftige Nutzung	15
4.3	Strategie 0: Instandhaltung mit regelmässigen Massnahmen	15
4.4	Strategie A: Vollständige Instandsetzung	16
4.4.1	Ziel und Erhaltungsmassnahmen	16
4.4.2	Erneuerung des Korrosionsschutzanstrichs	16
4.4.3	Ertüchtigung der Fahrbahnplatte mit bewehrtem UHFB.....	17
4.4.4	Umbau der Gerbergelenke	18
4.4.5	Ausrüstungsteile	19
4.4.6	Kosten und Finanzierung	19
4.5	Strategie B: Erneuerung mit Verbreiterung.....	19
4.5.1	Ziel und Erhaltungsmassnahmen	19
4.5.2	Abdichtung und Verbreiterung der Fahrbahnplatte mit bewehrtem UHFB.....	20
4.5.3	Kosten und Finanzierung	20
4.5.4	Erhöhung der Kapazität für Strassen- und Langsamverkehr	20
5	Folgerungen und Empfehlung	21

0 Zusammenfassung

Die momentan kontroverse Situation über die Zukunft des Willerzeller-Viadukts erscheint als wenig zielführend, da sie auf wenig plausiblen und widersprüchlichen Argumenten basiert. Dieses informelle Gutachten hat zum Ziel, die Qualitäten und die technische Leistungsfähigkeit des Willerzeller-Viadukts zu beschreiben und auch für eine Brückenbau-technisch interessierte Öffentlichkeit offenzulegen. Unter Anwendung moderner Ingenieurmethoden und –technologien werden Lösungen aufgezeigt, die zwischen einem ersatzlosen Abbruch des bestehenden Viadukts und einem Ersatzneubau mit grosser Kapazitätserhöhung liegen.

Die nachfolgenden Untersuchungen zeigen, dass das Willerzeller-Viadukt wesentliche kulturelle und materielle Werte aufweist und Teil der erforderlichen Infrastruktur für die weitere Entwicklung der Region Sihlsee ist. Der heutige Zustand der Viaduktstruktur ist annehmbar bis gut, und die Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit genügen den heute gültigen Normen. Das Willerzeller-Viadukt kann somit im Hinblick auf eine nächste lange Nutzungsdauer (von 80 Jahren) ertüchtigt werden. Dazu wurden drei Szenarien entwickelt, die auf künftige Nutzungsanforderungen reagieren. Der Kostenaufwand für diese Erhaltungs-Szenarien sind verhältnismässig und deutlich geringer als für einen Ersatzneubau.

Im Sinne einer zukunftsgerichteten Lösung wird empfohlen, die Strategie B «Erneuerung mit Verbreiterung» bevorzugt weiterzuverfolgen und die unter 4.5.4 dargelegte Option zur Erhöhung der Kapazität für Strassen- und Langsamverkehr zu untersuchen.

1 Ausgangslage

1.1 Bau des Etzelwerks

Die zu den SBB gehörende Etzelwerk AG begann 1932 mit dem Bau der Staumauer «In den Schlagen», mit welcher der künstliche Sihlsee zur Gewinnung von elektrischem Strom für den Bahnbetrieb realisiert werden konnte¹. Bei diesem Bauvorhaben mussten auch Strassen und Brücken um und über den künftigen Stausee gebaut werden. Als Seeüberquerungen wurden der 412m lange Steinbach-Viadukt (der 2014 durch einen Neubau in Stahlbeton ersetzt wurde) und das 1'115m lange Willerzeller-Viadukt (Bild 1) in nahezu identischer Konstruktion als Verbindungen an das rechte Seeufer erstellt.

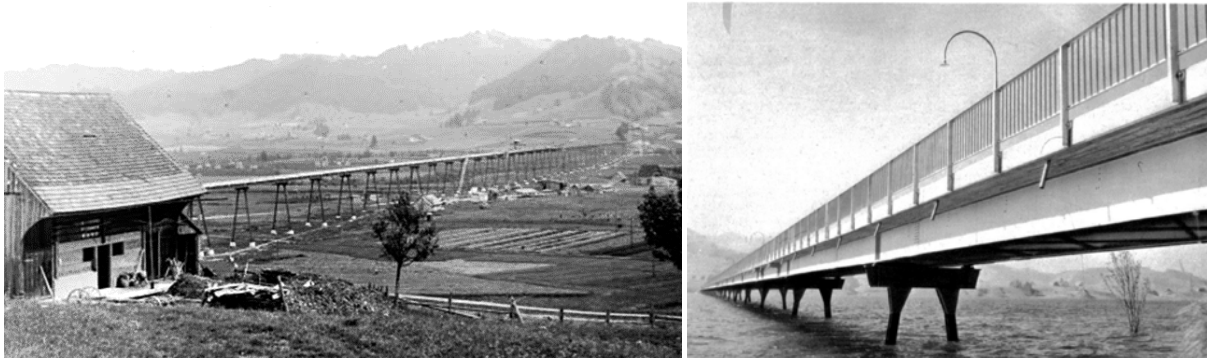


Bild 1: Historische Aufnahmen des Willerzeller-Viadukts: links: Sicht talabwärts², vor dem Einstau des Sihlsees; rechts: Ansicht³ nach dem ersten Einstau.

Bau und Unterhalt der beiden Strassenviadukte waren eine Auflage in der Konzession für die Nutzung des Sihlsees durch die SBB. Diese Konzession wurde 1937 unterzeichnet, 1987 verlängert und war während 80 Jahren bis Mai 2017 gültig. Seither läuft eine Übergangskonzession über 5 Jahre. Momentan verhandeln die SBB und die Konzessionsgeber (Kantone Schwyz, Zürich und Zug sowie die Bezirke Einsiedeln und Höfe) über eine neue Konzession. Dabei möchten die SBB die Bauwerkseigentümerschaft des Willerzeller-Viadukts an den Kanton Schwyz und den Bezirk Einsiedeln abtreten. Das Konzessionsdossier soll Ende 2018 bei den Konzessionsgebern zur Bewilligung eingereicht werden. Die neue Konzession soll spätestens nach Ablauf der Übergangskonzession Ende 2022 in Kraft treten. Ab 2025 wird das Etzelwerk am Sihlsee erneuert⁴.

Am 15. November haben die Schwyzer Regierung und der Bezirksrat Einsiedeln informiert, dass das Willerzeller-Viadukt abgebrochen werden soll⁵. Dabei wurde argumentiert, dass ein Neubau mit Kosten von 86 Millionen CHF⁶ notwendig sei; zusätzlich kämen jährliche Kosten für den Unterhalt des neuen Viadukts⁷ von 3.3 Millionen CHF (3.8% des Neubauwerts)⁸ hinzu. Diese Kosten könnten von Kanton und Bezirk nicht getragen werden, weshalb das bestehende Viadukt rückgebaut werden müsse.

¹ « Der Traum vom grossen blauen Wasser », Ein Film von Karl Saurer, Dokumentarfilm (85 Min.), Karl Saurer Einsiedeln, 1993.

² Foto : Leo Wehrle, Einsiedeln, 1936

³ Schweizer, W., Das Etzelwerk ist fertig, Die Berner Woche, Nr. 27, 1937.

⁴ Zürichsee-Zeitung 3. Mai 2017 "Das Etzelwerk am Sihlsee wird für 141 Millionen Franken erneuert"

⁵ Höfner-Zeitung: « Da stimmt etwas nicht », 30. Januar 2017

⁶ Im August 2014 wurde das neue, elegante Steinbach-Viadukt dem Verkehr übergeben. Mit diesem Ersatzneubau eines wesentlich breiteren Viadukts wurde eine bedeutende Erhöhung der Verkehrskapazität erzielt und in die weitere Entwicklung der Ski-Gebiete am Hoch-Ybrig investiert. Die Kosten für den Bau des neuen, 440m langen und 13m breiten Viadukts betragen rund 30 Millionen CHF (gemäss «Einsiedler Anzeiger» vom 22. August 2014, Seite 7), was einem Einheitspreis von 5'245 CHF pro m² nutzbare Fahrbahnfläche entspricht. Rechnet man diese Baukosten mit einem Drei-Satz auf eine Länge von 1'115m, ergeben sich Baukosten für einen neuen, 13m breiten Willerzeller-Viadukt von 76 Millionen CHF. Aufgerundet um einen Betrag von 10 Millionen CHF für Teuerung und Unvorhergesehenes ergibt schliesslich den vom Kanton Schwyz öffentlich bekannt gegebenen Betrag von 86 Millionen CHF.

⁷ Gemäss dem Fachbuch [Brühwiler, E., Menn, C. Stahlbetonbrücken, Springer Verlag, 2003.] ist für die Überwachung und den Unterhalt von Stahlbetonbrücken mit jährlichen Kosten von 0.50 – 0.65% zu rechnen. Diese Zahl ist als vorsichtig zu bewerten, da sie auf Erfahrungen der Vergangenheit beruhen und von neuen Stahlbetonbrücken wie das Steinbachviadukt eine bessere Dauerhaftigkeit mit einem entsprechend geringeren Unterhaltsaufwand erwartet werden darf.

⁸ Jährliche Unterhaltskosten von 3.8% des Neubauwerts erscheinen als wenig plausibel. Der Verfasser dieses Gutachtens war involviert in Fragen von Erhaltungsbudgets für Kunstbauten als Teil der Bewirtschaftung der gebauten Bahninfrastruktur in

Die Haltung der Regierung hat in der betroffenen Bevölkerung in Willerzell und Umgebung zu Unmut geführt. Es bildete sich eine Bürgerinitiative «Pro Viadukt Willerzell»⁹ mit dem Ziel, das Viadukt zu erhalten.

1.2 Volkswirtschaftliche Bedeutung des Willerzeller-Viadukts

Der materielle Wert von Infrastrukturbauwerken ist ganzheitlich zu beurteilen. Insbesondere raumplanerische Aspekte sind zu beachten, und jede Entscheidung, z.B. der Rückbau einer Strasse, hat immer volkswirtschaftliche Kosten¹⁰. Die Hauptargumente für die Erhaltung und weitere Nutzung des Willerzeller-Viadukts sind:

- Das Viadukt ist die wichtigste Erschliessungsstrasse nach Willerzell und Umgebung. Dieses Gebiet weist ein wichtiges Entwicklungspotential insbesondere für den Freizeit-Tourismus in der Region Sihlsee – Einsiedeln auf, das die Bevölkerung gewillt ist zu nutzen. Das Viadukt ist somit ein wichtiger Bestandteil der gebauten Infrastruktur, die für die Zukunft und weitere Entwicklung von Willerzell und der Umgebung des rechten Sihlseufers notwendig ist.
- Die Zufahrtsstrasse um das nördliche Sihlseebecken nach Willerzell ist schmal und führt in weiten Bereichen durch Moorgebiete. Diese Zufahrtsstrasse wird heute hauptsächlich durch Langsamverkehr genutzt. Die Zufahrt nach Willerzell über das südliche Sihlseebecken führt nach Überqueren des Steinbachviadukts ebenfalls über eine schmale Strasse. Ein kurzfristiger Ausbau dieser Zufahrtsstrassen ist unrealistisch und hätte bedeutende Investitionen zur Folge.
- Die Zunahme des Verkehrs über das Nord- und Südbecken des Sihlsees nach einem Abbruch des Viadukts wäre als Verkehrsführung nachteilig und würde zu Problemen der Verkehrssicherheit führen. Das Willerzeller-Viadukt schützt somit das Nord- und Südbecken des Sihlsees vor Pendlerverkehr.
- Das Viadukt ist eine direkte Zufahrt für die Fahrzeuge des Notfalldienstes (Feuerwehr, Krankenwagen, ...). Mit der Aufhebung der Seequerung müsste in Willerzell ein Feuerwehrstützpunkt gebaut und betrieben werden.
- Das Viadukt ist wichtig für den Busbetrieb und die Anbindung der Bevölkerung des rechten Sihlseufers an das öffentliche Verkehrsnetz.

2 Zielsetzung: Weshalb dieses informelle Gutachten ?

Die momentan kontroverse Situation über die Zukunft des Willerzeller-Viadukts ist wenig zielführend, zumal sie auf wenig plausiblen und widersprüchlichen Argumenten basiert. Dieses Gutachten hat somit zum Ziel, die Qualitäten und die technische Leistungsfähigkeit des Willerzeller-Viadukts zu beschreiben und auch für eine Brückenbau-technisch interessierte Öffentlichkeit offenzulegen. Es sollen Lösungen aufgezeigt werden, die zwischen einem ersatzlosen Abbruch des bestehenden Viadukts und einem Ersatzneubau mit grosser Kapazitätserhöhung liegen. Es wird aufgezeigt, dass die Erhaltung des Viadukts aus volkswirtschaftlicher Sicht verhältnismässig ist. Entsprechend werden Strategien im Hinblick auf eine langfristige Erhaltung des Viadukts entwickelt.

Zentral sind die Fragen: Wie ist der Zustand des Viadukts ? Was sind die Anforderungen an eine künftige Nutzung und wie können sie erfüllt werden ? Wie gross ist der Kostenaufwand, um das Viadukt für eine nächste lange Nutzungsdauer von wiederum 80 Jahren zu ertüchtigen ?

Dieses Gutachten ist von informeller Natur und steht allen Interessenten zur Verfügung.

Der Verfasser dieses Gutachtens war von 1991 bis 1994 Brückeningenieur der SBB in Zürich und seit 1995 Professor für Erhaltung und Sicherheit von bestehenden Bauwerken an die ETH Lausanne (EPFL – Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne). Neben Lehre und Forschung war und ist der Verfasser in zahlreiche Projekte zur Überprüfung und Erhaltung von bestehenden Brücken und Hochbauten in der Schweiz und im Ausland tätig. In seiner Funktion als ETH-Professor erachtet es der Verfasser als eine Aufgabe, zu Fragen der Erhaltung von Bauwerken wie das Willerzeller-Viadukt Stellung zu nehmen und dabei Lösungswege unter Anwendung moderner Ingenieurmethoden und –technologien aufzuzeigen.

zwei europäischen Ländern und im Kanton Waadt. Die in der Vergangenheit getätigten und aus technisch-wirtschaftlicher Sicht notwendigen jährlichen Unterhaltskosten von Brücken sind je nach Konstruktionsart deutlich geringer als 1%.

⁹ <https://www.willerzell.ch/index.php/kommision>

¹⁰ NFP 54 : « Nachhaltige Siedlungs- und Infrastrukturentwicklung – Von der Verwaltung zur aktiven Entwicklung », Programmsynthese, Schweizerischer Nationalfonds Bern, vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich, 2011, und: Brühwiler, E., Hainard, F., Steiger, U., Siedlungen und Infrastrukturen ganzheitlich weiterentwickeln – Abschluss des NFP54 „Nachhaltige Siedlungs- und Infrastrukturentwicklung“, Geomatik Schweiz, 12/2011, S.582-583.

Beim Verfassen dieses informellen Gutachtens dienten mehrere Dokumente über das Willerzeller-Viadukt sowie auf Internet abrufbare Informationen als Grundlage. Der Verfasser dieses Gutachtens hat am 6. Mai das Viadukt besichtigt. Die Überprüfung des Viadukts erfolgt nach den heute gültigen Normen, d.h. die Normen SIA 269 und SIA269/1-4¹¹.

3 Brückenbautechnische Überprüfung und kulturelle Bewertung

3.1 Beschreibung der Viaduktkonstruktion

Das 1'115m lange Viadukt über den Sihlsee nach Willerzell ist vermutlich das längste Strassenviadukt der Schweiz ausserhalb der Nationalstrassen. Das Viadukt musste auf einem Baugrund aus Torf und Seeschlamm mit geringer Tragfähigkeit fundiert werden. Aus diesem Grund musste eine möglichst leichte und flexible Konstruktion gefunden werden, die für tiefe Baukosten gebaut werden konnte. Aus dieser «Not» heraus, wurde die damals innovative Stahl-Beton Verbundbauweise (siehe unter 3.2) gewählt für die Konstruktion des leichten Überbaus (Träger des Viadukts)¹². Der Querschnitt des Überbaus besteht aus gewalzten Stahlprofilen als Hauptträger, die durch Querträger miteinander verbunden sind. Auf diese Stahlkonstruktion wurde eine bewehrte Platte betoniert. Diese Stahlbetonplatte ist mit mechanischen Verbundmitteln mit den Stahlträgern verbunden. Die beiden Bauteile Stahlträger und Stahlbetonplatte wirken in starrem Verbund. Dieser Überbau ist auf Stahljochen aufgelegt (Bild 2).

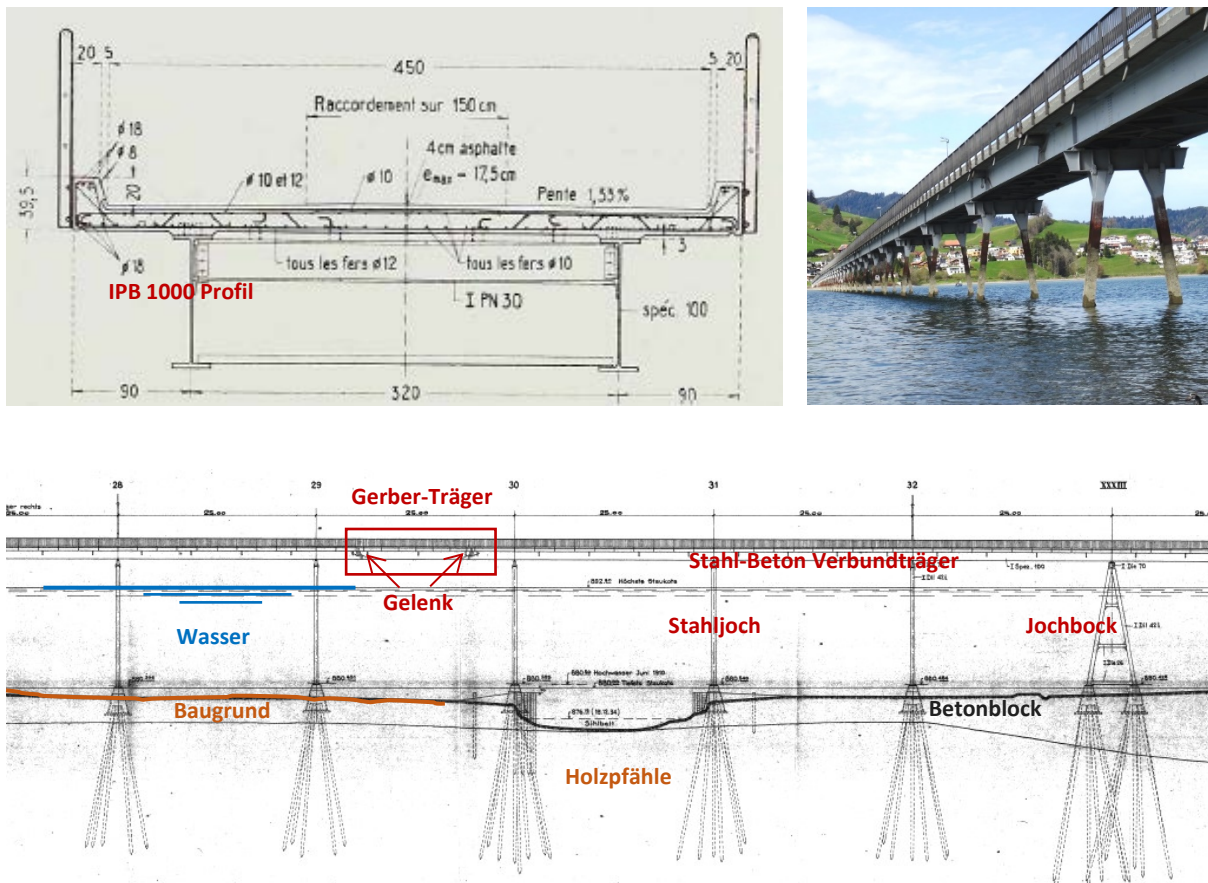


Bild 2. Oben links: Querschnitt des Verbundträgers (aus [12]); oben rechts seitliche Ansicht (6. Mai 2017) mit Pfeilern und Überbau; unten: Ansicht (Planausschnitt) des Tragwerksystems mit Stahljochen und Jochbock sowie Gerber-Träger.

¹¹ Der Verfasser dieses Gutachtens ist seit 1991 im SIA Normenwesen aktiv, vor allem im Zusammenhang mit den SIA Regelwerken zur Erhaltung bestehender Bauwerke. Er entwarf 2003 das Konzept der seit 2011 veröffentlichten Normenreihe SIA 269 „Erhaltung von Tragwerken“, war von 2006 bis 2011 Mitglied der Projektleitung der Normenreihe SIA 269, und leitete von 2004 bis 2012 die Normkommission SIA 260, welche die Grundlagennorm SIA 269 erarbeitete und die Norm SIA 260 revidierte.

¹² Wichser, O. Nouveaux ponts-routes sur le Sihlsee (Suisse), Ossature métallique, Juni 1947, pp.267-272.

Der 1'115m lange Überbau ist in insgesamt 45 Feldern unterteilt: 43 Felder mit einer Spannweite von je 25m und 2 Randfelder von 20m Spannweite. Zur Aufnahme der Dilatationsbewegungen des Überbaus von insgesamt +28cm infolge einer angenommenen Temperaturvariation von +25°C ist der Viadukt in 8 Abschnitte aufgeteilt, indem in den Feldern: 5 – 11 – 17 – 23 – 29 – 35 – 41 insgesamt 7 eingehängte Träger (sogenannte Gerber-Träger) angeordnet sind (Bild 2). Ein Gerber-Träger besteht aus einem einfachen Balken einer Spannweite von 13.9m, der auf (von den Pfeilern auslaufenden) Kragarmen einer Spannweite von 5.5m eingehängt sind. Ein Gelenk ist beweglich ausgebildet, sodass sich dort die Dilatationsbewegungen einstellen können.

Somit besteht der Überbau aus 6 Regel-Durchlaufträgern über 5 Felder (von 25m Spannweite) (oder einer Länge von 750m), 7 Feldern mit Gerber-Träger (von 25m Spannweite) (oder eine Länge von 175m) und zwei Rand-Durchlaufträger über 4 Felder (3 x 25m + 20m = 95m) (oder eine Länge von 190m), was insgesamt die 1'115m Gesamtlänge des Überbaus ergibt.

Der Unterbau des Viadukts besteht aus Pfeilerjochen in Stahlbauweise, die in Querrichtung ausgefacht sind und Längen von 3.5m bis 16m aufweisen. 6 Joche sind als dreieckförmiger «Bock» konstruiert, um Kräfte in Längsrichtung (Bremskräfte, Kräfte durch Dilatationsbewegungen) aufnehmen und in den Baugrund ableiten zu können (Bild 2). Diese Jochböcke dienen somit auch der Befestigung der Regel-Durchlaufträger. 38 Joche sind als Pendelstützen ausgebildet, auf denen der Überbau auf Lagern gleitet. An den Enden des Viadukts ist der Überbau auf je einem massiven Widerlager in Betonbauweise aufgelagert und fixiert.

Die Stahljoche sind in einem Betonblock eingegossen, der auf je zwei pyramidenförmig gerammten Pfahlgruppen von 5 bis 8 Holzpfählen mit bis zu 28 Metern Länge aufgelagert und verbunden ist. Diese Holzpfähle wurden beim Bau mit einer Dampfzange in den Grund getrieben.

Bei den Belastungsversuchen unmittelbar nach Bauende wurde das durch die Berechnungen der Ingenieure erwartete Tragverhalten bestätigt. Die gemessenen Spannungen im Beton-Stahl-Verbundträger waren etwa 20% geringer, was auf einen starren Verbund schliessen liess, und die Schwingungen (infolge einer im Gleichschritt marschierenden Personengruppe !) in horizontaler und vertikaler Richtung waren gering und damit zulässig¹³.

3.2 Bewertung der kulturellen Werte des Viadukts

Nachfolgend werden die kulturellen Werte des Willerzeller-Viadukts gemäss einer im Buch «Schweizer Bahnbrücken»¹⁴ vorgeschlagenen Systematik im Sinne der Norm SIA 269 (Ziffer 2.1.4) beschrieben und bewertet.

a) Situationswert und bauhistorisch-kulturelle Werte

Bezug zur Umgebung (Bild 3): Das Viadukt ist als Seequerung von vielen Orten aus gut sichtbar. Das schlichte, filigrane Viadukt mit seinen rasch abfolgenden Pfeilerjochen und der strengen Linie seines Überbaus integriert sich dank der klaren Gliederung und leichten Erscheinung in die sanfte Seelandschaft. Das Viadukt erscheint als markantes, eigenständiges Objekt, das die Seefläche unterteilt und das Umgebung als Bezugspunkt prägt.



Bild 3. Ansicht des Viadukts von Willerzell aus (6. Mai 2017).

Das Viadukt ist ein wichtiger Zeuge der technischen, wirtschaftlichen und sozialen Entwicklung, die mit dem Bau des Etzelwerks in der Region Sihlsee Einzug hielt.

¹³ Wichser, O. Nouveaux ponts-routes sur le Sihlsee (Suisse), Ossature métallique, Juni 1947, pp.267-272.

¹⁴ 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.

b) Ästhetische Werte

Die Konstruktion des Viadukts auf dem wenig tragfähigen Baugrund beruhte auf einem pragmatischen Ansatz: möglichst leicht und kostengünstig. Daraus entstand eine einfache und schlichte Konstruktion, die leicht und filigran wirkt und auch klar die ihr innewohnende Funktion anzeigt: eine direkte Seequerung, die über dem Wasser zu schweben scheint.

Das Viadukt visualisiert technische Effizienz (Bild 3 und 4): Mit einem Verhältnis von Trägerhöhe zu Spannweite von etwa 1:20 ist der Brückenträger schlank. Die rasch abfolgenden, feingliedrigen Pfeilerjoche ermöglichen dennoch eine grosse Transparenz, vermitteln aber auch den Eindruck von Stabilität. Die Repetition der immer gleichen Jochkonstruktion und die schnörkellose, gerade Linie des Überbaus verleihen dem Viadukt einerseits Ordnung und Strenge, andererseits eine gewisse Dynamik und Kühnheit. Die hellgraue Farbe des Korrosionsschutzanstrichs der Stahlkonstruktion und die gut proportionierten Randabschlüsse der Betonplatte tragen zur Integration des Viadukts in seine Landschaft bei.



Bild 4. Eindrücke des Willerzeller-Viadukts (6. Mai 2017).

Die Symmetrie des Querschnitts und die konsequente Wiederholung von gleichen Bauteilen tragen zur Einheitlichkeit und Ordnung bei. Das funktionale Bauwerk in natürlicher Umgebung wurde richtigerweise schlicht gestaltet, und es wurde auf dekorative Elemente verzichtet. Nur auf halber Viaduktlänge grüsst ein Wegkreuz die vorbeifahrenden Viaduktbenutzer.

c) Werte aus der Sicht der Geschichte der Ingenieurbautechnik

Die Stahl – Beton Verbundkonstruktion des Willerzeller-Viadukts nimmt einen prominenten Platz ein in der Geschichte des Verbundbrückenbaus¹⁵. In der Zeit von 1925 bis 1945 wurden nämlich verschiedene Tragwerkssysteme entwickelt, um die beiden Verbundpartner, Stahlträger und Betonplatte, miteinander schubfest zu verbinden. Unter der Leitung des damaligen SBB-Brückenbauchefs Adolph Bühler (1882-1951)¹⁶ wurden in den 1920er Jahren von den SBB massgebende Messungen des direkten Haftverbunds zwischen Stahl und Beton von im Beton eingegossenen Walzträgern durchgeführt. Danach wurden durch Schweizer Ingenieure entwickelte, mechanische Verbundmittel durch Mirko Roš (1879-1962) an der EMPA geprüft. Der damalige ETH-Stahlbauprofessor Fritz Stüssi (1901-81) untersuchte experimentell und theoretisch die Stahl-Beton

¹⁵ Pelke, E., Kurrer, K.-E., Zur Entwicklungsgeschichte des Stahlverbundbaus, Stahlbau 85 (2016), Heft 11, Ernst & Sohn Verlag Berlin, S. 764-780.

¹⁶ Adolf Bühler (geboren am 9.3.1882 Wollishofen (Zürich), gestorben am 7.9.1951 Bern). Kantonsschule Zürich, 1900-04 Bauingenieurstudium am Polytechnikum (ETH) Zürich. Nach Anstellungen bei Konstruktionsfirmen in der Schweiz, Italien und Deutschland, wo er teils preisgekrönte Brückenentwürfe ausarbeitete, trat B. 1912 ins Brückenbaubüro bei der Generaldirektion der SBB ein; 1918-44 Sektionschef für Brückenbau, 1944-47 Vorsteher der Abteilung für Bahnbau und Kraftwerke. B. erarbeitete ein Programm zur Anpassung der Brücken an die schweren elektr. Lokomotiven, verhalf der Schweissttechnik im Brückenbau in den 1920er Jahren zum Durchbruch und leistete Pionierarbeit im vorgespannten Betonbau; daneben war er im Hoch-, Kraftwerk- und Leitungsbau tätig und an der Konstruktion der Leichtstahlwagen beteiligt. Zu seinen letzten Werken gehörte der viergleisige Aareübergang bei Bern. (Anmerkung E.B.: Das 1'092m lange SBB Lorraineviadukt in Betonbauweise von 1941 ist mit dem 150m weit gespannten Betonbogen über die Aare eine der eindrucklichsten Brücken der Schweiz.) 1937 Dr. h.c. der Ingenieurschule der Univ. Lausanne. (Quelle: historisches Lexikon der Schweiz)

Verbundkonstruktion und wurde dabei durch die damalige «Technische Kommission des Verbandes der Schweizerischen Brücken- und Eisenhochbau-Fabriken (T.K.V.S.B.)» unterstützt. Dies führte zu einem bedeutenden Erkenntnisgewinn. Die Schweizer Ingenieure waren damals in Europa auf dem Gebiet des Stahl-Beton Verbundbaus führend.

Diese führende Stellung setzte die Firma Stahlbau Zschokke AG unter der Leitung von Fritz Bühler (1891–1959) schon 1936 in gebaute Wirklichkeit um: Als erste europäische Brücke besitzt das Willerzeller-Viadukt über aufgeschweißte Verbunddübel aus U-Profilstücken als starre Schubverbindung zwischen Stahlträger und Betonplatte. Aus heutiger Sicht darf folglich die Verbundkonstruktion der Sihlsee-Viadukte als bedeutender Technologiesprung auf dem Gebiet des Brückenbaus gewürdigt werden.

Aus diesem kurzen, geschichtlichen Exkurs kann hergeleitet werden, dass das Willerzeller-Viadukt und das Steinbach-Viadukt vermutlich vom SBB-Brückenbauchef Adolph Bühler entworfen wurde. Das Bauprojekt wurde von der Firma Stahlbau Zschokke AG in Döttigen AG ausgearbeitet und federführend zusammen mit weiteren Baufirmen ausgeführt wurde; die Stahlbetonplatte wurde von den Firmen Locher AG und Züblin AG aus Zürich gebaut¹⁷. Das Verbundverhalten der damals neuartigen Bauweise wurde vorgängig an der EMPA anhand von Versuchen an Biegeträgern unter der Leitung von Mirko Roš nachgewiesen (Bild 5)¹⁸.

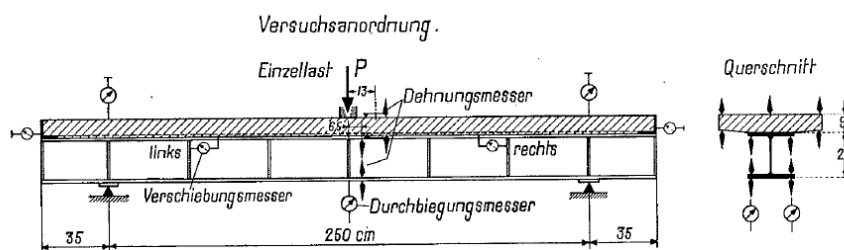


Abb. 97. Etzelwerk A.-G. 1935/36. Verbund-Versuchsträger I DIN 24 mit \perp -Dübeln
Versuchsanordnung mit den Messstellen

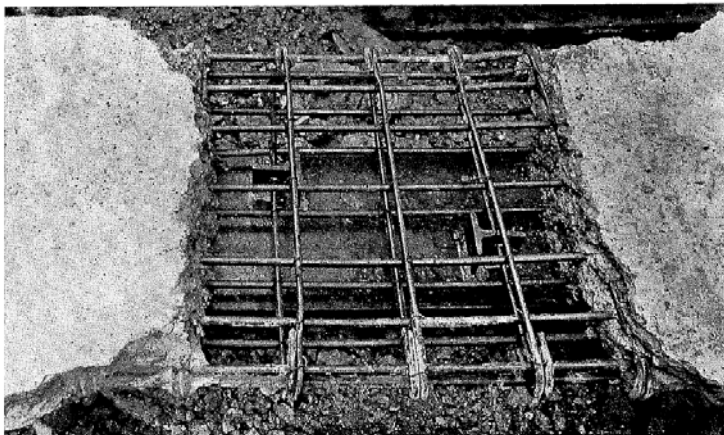


Abb. 100. Etzelwerk A.-G. 1935/36. Verbund-Versuchsträger I DIN 24 mit \perp -Dübeln
Statische Erschöpfung $P = 61$ t, Zerdrückung der Betonplatte. \perp -Dübel und Stahlarmierung unbeschädigt

Bild 5. Auszug dem Versuchsbericht von Mirko Roš (Fussnote 18).

d) Emotionale Werte

Das Viadukt wird von der Bevölkerung nicht nur als Nutzobjekt, sondern auch als soziokulturelle Geste wahrgenommen, das in der Region und insbesondere in Willerzell Identität schafft. Das Viadukt ist in der Gegend längst zu einem Wahrzeichen geworden und besitzt auch einen Liebhaberwert.

¹⁷ Wichser, O. Nouveaux ponts-routes sur le Sihlsee (Suisse), Ossature métallique, Juni 1947, pp.267-272.

¹⁸ Technische Kommission des Verbandes der Schweizerischen Brücken- und Stahlhochbau-Unternehmungen (T.K.V.S.B.) (Ed.): Träger in Verbundbauweise; A) Mirko Roš: Ergebnisse der EMPA-Versuche 1942–1943; B) Alfred Albrecht: Ausführung – Berechnung – Konstruktive Gestaltung – Erfahrung, 1935–1944. Zürich: T.K.V.S.B

e) Bewertung

Insgesamt steht das Willerzeller-Viadukt für höchste Effizienz in allen Belangen: ein einfaches und klares Erscheinungsbild, möglichst geringer Materialeinsatz durch Umsetzung einer innovativen Bauweise, kurze Bauzeit und vermutlich minimale Baukosten. Das Willerzeller-Viadukt ist ein Bauwerk, das in der Schweiz einzigartig ist. Entsprechend sind die kulturellen Werte als hoch einzuschätzen. Es handelt sich um einen wichtigen Zeugen der Schweizer Brückenbaukunst und auch des Baus der Wasserkraftanlagen zur Gewinnung von Elektrizität in der Schweiz.

3.3 Generelle Überprüfung der Viaduktstruktur

3.3.1 Zustandsbeurteilung

Nachfolgend werden die wichtigsten Aspekte bezüglich des Zustands des Viadukts beurteilt: 1) Stahlkonstruktion und Korrosionsschutz, 2) Fahrbahnplatte und 3) Fundament.

1) Stahlkonstruktion und Korrosionsschutz

Bei der Beurteilung des Korrosionszustands der Stahlkonstruktion ist zu unterscheiden zwischen a) allgemein die durch die Fahrbahnplatte geschützten Bereiche und b) lokal die Bereiche der Gelenke und Fugen der Gerber-Träger.

a) Allgemein: Die grossmehrheitliche Fläche der Stahlkonstruktion, d.h. die beiden Hauptträger, Querträger, Verbände und der Kopfbereich mit Traverse der Pfeilerjoche, ist durch die als «Schutzdach» wirkende Fahrbahnplatte vor Regen geschützt. Der Zustand der Stahlkonstruktion ist gut bis befriedigend (Bild 6), denn die mit dem hellgrauen Anstich versehenen Flächen sind vor Korrosion geschützt. Die wenigen sichtbaren Korrosionsstellen beschränken sich auf einzelne Flächen von Unterflanschen und einzelne Grenzbereiche zwischen Beton und Oberflansch der Stahlträger. Der Korrosionsschutzanstrich der Stützenbereiche, die sich im Bereich des wechselnden Wasserstands des Sihlsees befinden, ist hingegen über die Zeit durch Wasserwellen und Regen abgetragen worden (Bild 6 oben links). Diese Flächen sind – bei tiefen Wasserstand – einer langsam ablaufenden, flächigen Korrosion ausgesetzt.





Bild 6. Allgemein noch guter Zustand des Korrosionsschutzanstrichs (6. Mai 2017)

Die Untersuchungen der Schichtstärken des Korrosionsschutzanstrichs durch das Ingenieurbüro Flückiger + Bosshard¹⁹ ergaben eine stark variable Schichtstärke von 130 – 400µm und eine noch gute Haftung des Anstrichs. Somit ist der bestehende Korrosionsschutzanstrich weiterhin wirksam.

Im gleichen Bericht finden sich keine Hinweise, wonach der Korrosionsschutzanstrich seit dem Bau des Viadukts vollständig erneuert worden wäre. Der Anstrich ist demnach seit rund 80 Jahren wirksam, was von einer sehr guten Dauerhaftigkeit zeugt, denn üblicherweise werden 30 Jahre als Dauer der Wirksamkeit von Korrosionsschutzanstrichen angenommen. Dieser heute allgemein noch gute Zustand des Korrosionsschutzes lässt erklären, weshalb bisher am Korrosionsschutzanstrich keine grossen Unterhaltsarbeiten ausgeführt wurden.

b) Lokal: In den Bereichen der Gelenke und Dilatationsfugen (Fahrbahnübergänge) der 7 Gerber-Träger ist der Korrosionsschutz wahrscheinlich seit längerer Zeit nicht mehr wirksam und es findet eine mehr oder weniger aktive Korrosion statt (Bild 7 oben links und Mitte).



Abb. 2.5 Randbereich bei FÜ 2 (Einfachprofil), OWS Korrosionsschäden 2010



Abb. 2.6 Gerbergelenk bei FÜ 2 (fest) Korrosionsschäden 2010



Bild 7. Korrosion der Stahlbauteile der Gerbergelenke bei den Fahrbahnübergängen. Oben links und Mitte: Aufnahmen von 2010 (aus [19]); Oben rechts und unten: guter Zustand von Gerbergelenken im Juni 2017²⁰.

¹⁹ Flückiger+Bosshard AG Ingenieurbüro für Hoch- und Tiefbau: Willerzeller-Viadukt: Stahlkonstruktion und Fahrbahnplattenuntersicht, Zustandsuntersuchung und Massnahmenkonzept in Varianten, Bericht 0148.3.16., Zürich, 5.4.2012.

²⁰ Fotos E.Kälin, 3. Juni 2017.

Dies ist auf die undichten Fugenkonstruktionen zurückzuführen, indem Wasser, im Winter mit Tausalzen belastet, durch diese Fugenkonstruktionen dringt und direkt auf die darunterliegenden Stahlbauteile einwirkt und so eine Korrosionsaktivität unterhält. Es ist zu vermuten, dass in diesen Bereichen – ausser dem Ersetzen des elastischen Fugenabdichtungsbands – noch nie wesentliche Unterhaltsarbeiten ausgeführt wurden, sodass die Stahlkonstruktion seit vielen Jahren korrodiert.

Einige besonders exponierte Stellen könnten entsprechend einen starken Materialabtrag aufweisen. Jedoch weisen mehrere Gerbergelenkstrukturen auf einen noch befriedigenden Zustand hin (Bild 7 oben rechts und unten). Zudem ist das Gelenkdetail derart ausgebildet, dass ein plötzliches Versagen der Gelenkstruktur wenig wahrscheinlich ist.

Zustandsentwicklung: Im Bericht Flückiger+Bosshard fehlt eine Aussage über die Entwicklung des bisherigen Korrosionsfortschritts über die letzten Jahrzehnte. Eine solche Aussage hätte basierend auf den Berichten der (alle 5 Jahre) durchgeführten Hauptinspektionen gemacht werden können. Aufgrund der Erfahrungen mit Stahlbrücken ähnlicher Bauweise und Exposition läuft der Materialabtrag der Bereiche mit aktiver Korrosion relativ langsam ab. Es darf davon ausgegangen werden, dass beispielsweise in 5 Jahren a) der allgemeine Korrosionszustand der geschützten Stahlkonstruktion gleich gut sein wird, weil der Korrosionsschutzanstrich über die nächsten 5 Jahre noch wirksam sein wird, und b) im Bereich der Gerbergelenke (Fahrbahnübergänge) der Materialabtrag der korrodierenden Zonen fortschreiten wird, doch ist ein Versagen der Gelenkstruktur weiterhin wenig wahrscheinlich. Dennoch sollten – im Sinne einer ergänzenden Sicherheitsmassnahme – diese Gelenkstrukturen z.B. 1 Mal jährlich gezielt überwacht werden.

2) Stahlbetonfahrbahnplatte und Risiko einer Bewehrungskorrosion

Der Zustand der Fahrbahnplatte aus Stahlbeton ist heute befriedigend bis gut. Die Untersicht der Betonplatte (Bild 6) zeugt von einem guten Zustand, d.h. es gibt keine Anzeichen von Bewehrungskorrosion im Beton. Die Randabschlüsse wurden vor 10 Jahren instandgesetzt und sind heute in einem noch guten Zustand. Allfällig wieder aufgetretene vereinzelte Schäden (in Form von Bewehrungskorrosion) an den erst vor 10 Jahren instandgesetzten Randabschlüssen sind nicht relevant für die Tragsicherheit des Trägers.

Das System Belag / Abdichtung der Fahrbahnoberfläche wurde ebenfalls vor 10 Jahren erneuert. Gemäss bisherigen Erfahrungen darf erwartet werden, dass dieses System noch weitere 10 Jahre funktionstüchtig sein wird, auch wenn bereits erste Belagsschäden (Risse) sichtbar sind (Bild 8, links).

Die in der Fahrbahnplatte eingelassene Dilatationsfugenkonstruktion (Bild 8) ist wohl funktionstüchtig hinsichtlich der Aufnahme der temperaturbedingten Dilatationsbewegungen des Viadukts, jedoch in der Regel nicht wasserdicht, auch wenn die Fugen-Gummibänder regelmässig ausgewechselt werden. (Der Durchtritt von Wasser durch diese Fugenkonstruktionen führt zu den Korrosionsschäden der Gerbergelenke (Bild 7).)

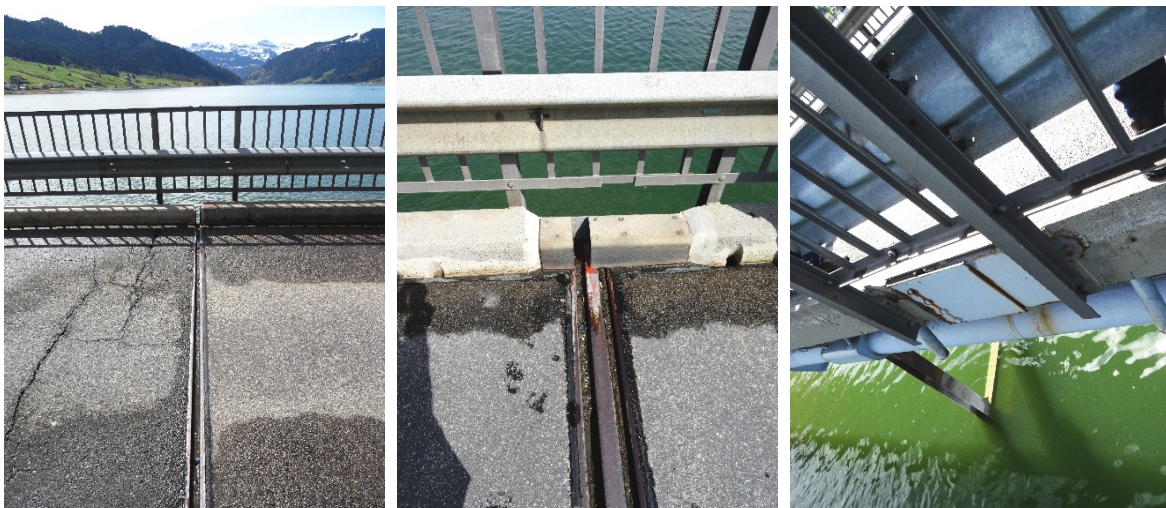


Bild 8. Fugenkonstruktion des Gerberträgers: fixiertes Gelenk (links) mit einem Fugenband und bewegliches Gelenk (Mitte) mit zwei Fugenbändern zwischen Stahlbauteilen; Randabschluss mit Blechabdeckung (rechts) beim beweglichen Gelenk. (Fotos: 6. Mai 2017)

3) Fundament

Allfällige Baugrundbewegungen und Setzungen der Pfeiler wurden periodisch überwacht. Bisher wurden keine Auffälligkeiten festgestellt, die einen Eingriff in die Fundamente erforderlich gemacht hätten. Das Viadukt hat über die bisherige 80 Jahre Nutzungsdauer keine wesentlichen Setzungen erfahren, welche die Funktionstüchtigkeit oder Tragsicherheit in Frage gestellt hätten. Es darf vermutet werden, dass die Fundamente der Pfeilerjoche intakt sind, zumal sich die Holzpfähle immer in mit Wasser gesättigtem Baugrund befinden und somit sich noch in einem guten Zustand befinden müssen.

3.3.2 Gebrauchstauglichkeit

Die Anforderungen an die Gebrauchstauglichkeit im Sinne der Norm SIA 269 sind erfüllt, da das Viadukt hinsichtlich Funktionstüchtigkeit (z.B. Durchbiegung, Verformungen) und Komfort (z.B. Schwingungen) keine Probleme bietet. Das Viadukt ist für den Benutzer «normal» benutzbar.

3.3.3 Tragsicherheit

Die Tragsicherheit des Verbundträgers wurde bezüglich der Anforderungen der Norm SIA 269 auf der Basis der Lastmodelle gemäss der Norm SIA 269/1 und Angaben zu Widerstandsmodellen von Stahlbeton, Stahl und Stahl-Beton Verbund der Normen SIA269/2-4 rechnerisch nachgewiesen. Die wichtigsten Ergebnisse lauten:

- Die Tragsicherheit gemäss den heute gültigen Normen ist nachgewiesen. Dies bedeutet, dass die Viaduktkonstruktion den gesetzlich zugelassenen Strassenverkehr aufnehmen kann. Eine Lastbeschränkung ist somit aus technischer Sicht nicht notwendig²¹.
- Bereits unter Verwendung von einfachen Widerstandsmodellen für den Stahl-Beton Verbundträger konnten Tragreserven von etwa 10% nachgewiesen werden. Es ist zu erwarten, dass bei einer detaillierten Ermittlung der Tragwiderstände die Tragreserven grösser als 10% sein werden.
- Da hinsichtlich des Korrosionszustands der Stahlkonstruktion in den nächsten Jahren keine Schäden zu erwarten sind, welche den Tragwiderstand der massgebenden Bauteile beeinträchtigen könnten, gilt die Aussage der genügenden Tragsicherheit auch über die nächsten Jahre.
- Die Beanspruchung der Stahl-Beton Verbundkonstruktion war bisher betreffend Anzahl und Achslasten der Fahrzeuge gering. Damit sind auch Fragen der Ermüdung der Stahlkonstruktion, insbesondere des Verbunddetails (aufgeschweisste T-Stahlbauteile) zwischen Stahl und Beton, unbedeutend.

Eine Kontrolle mit den Ergebnissen der Tragsicherheitsnachweise von Flückiger+Bosshard von 2005²², welche zum Teil grosse Tragreserven ausweisen, hat gezeigt, dass die Ergebnisse der Nachweise plausibel sind.

3.3.4 Nutzersicherheit

Die Fahrbahnbreite von nur 4.5m war in den 1930er Jahren für Strassen von sekundärer Bedeutung üblich. Mit den heute breiteren Personenwagen ist das Kreuzen von Fahrzeugen nur bei geringer Geschwindigkeit gut möglich ist. Die signalisierte Geschwindigkeitsbegrenzung von 60km/h ist zweckmässig (Bild 9).

Es darf festgehalten werden, dass hinsichtlich der Unfallstatistik das Viadukt offenbar keine Auffälligkeiten zeigt. Dies dürfte darauf zurückzuführen sein, dass bei den gegebenen, engen Verhältnissen die Geschwindigkeit der Fahrzeuge automatisch verlangsamt wird und das Fahrverhalten vorsichtiger ist.

Das Viadukt wird auch von Bussen des öffentlichen Verkehrs sowie von Lastwagen befahren, welche das Kreuzen erschweren. Der Langsamverkehr (Radfahrer) findet aufgrund der engen Verhältnisse unbefriedigende und gefährliche Verhältnisse vor.

Im Hinblick auf einen künftigen Verkehr ist bei Aufrechterhalten der 4.5m breiten Fahrbahn die Betriebssicherheit in Frage zu stellen.

²¹ Es gilt zu unterscheiden zwischen technischer Leistungsfähigkeit einer Brückenkonstruktion und verkehrspolitischen Nutzeranweisungen. Auch wenn für das Willerzeller-Viadukt aus technischer Sicht keine Lastbeschränkung notwendig ist, kann es aus Sicht der Verkehrsgestaltung in einer Region durchaus Sinn machen, eine Brücke mit einer Lastbeschränkung zu belegen, um so den Lastwagenverkehr zu steuern.

²² Flückiger+Bosshard AG Ingenieurbüro für Hoch- und Tiefbau: Willerzeller-Viadukt - Erhaltungskonzept, Bericht 0148.3.9., Zürich, Dezember 2005.

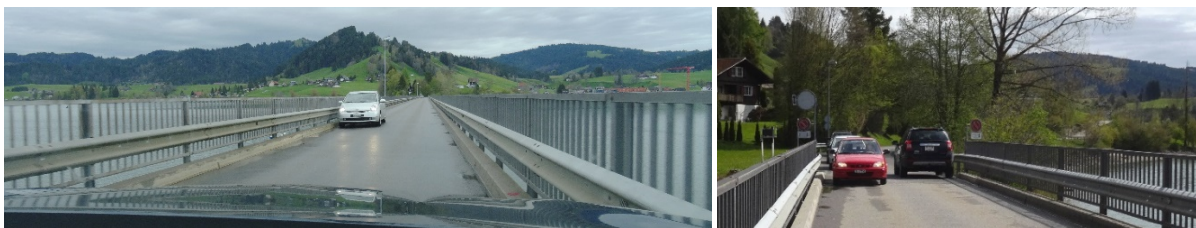


Bild 9. 4.5m breite Strassenfahrbahn des Viadukts mit Geschwindigkeitsbeschränkung; der engen Fahrbahnbreite angepasstes, vorsichtiges Kreuzen von Personenwagen. (Fotos: 6. Mai 2017)

3.4 Folgerungen und Empfehlungen

Die Hauptfolgerungen der generellen Überprüfung der Viaduktstruktur lauten:

- Die Konstruktion des Willerzeller-Viadukts erfüllt die Anforderungen bezüglich Tragsicherheit und Gebrauchstauglichkeit gemäss den heute gültigen Normen.
- Die Konstruktion des Viadukts ist allgemein in einem annehmbaren bis guten Zustand (Note 2²³). Die Fahrbahnübergänge und Gerbergelenke (Note 3) sind als die massgebenden konstruktiven Schwachstellen der Konstruktion bekannt und bedürfen einer besonderen Aufmerksamkeit. Andere Schwachstellen sind von untergeordneter Bedeutung. Eine Instandsetzung und Verbesserung dieser Schwachstellen und Schäden ist aus technischer Sicht gut machbar.
- Das Willerzeller-Viadukt kann kurzfristig weiterhin und ohne Gewichtsbeschränkung in Betrieb bleiben. Langfristig und im Hinblick auf eine nächste lange Nutzungsdauer sind jedoch Erhaltungsmassnahmen notwendig.

Es wird empfohlen, ergänzende Sicherheitsmassnahmen gemäss SIA269 Ziffer 7.5 zu treffen. Diese betreffen einzig die Dilatationsfugen (Fahrbahnübergänge) und Gelenke der eingehängten Gerber-Träger, deren Zustand durch Zwischeninspektionen (1 x pro Jahr) überwacht werden soll, bis diese Konstruktionsteile durch Unterhaltsarbeiten instand gestellt werden. Für die Viaduktbereiche ausserhalb der Gerberträger sind keine besonderen Massnahmen angezeigt, und das Fortführen der bisherigen Überwachung, d.h. Hauptinspektion alle 5 Jahre, ist genügend.

²³ Die für Brücken übliche Zustandsbewertung in Form von Noten lautet : 1=gut ; 2=annehmbar; 3=schadhaft ; 4=schlecht ; 5=alarmierend.

4 Erhaltungsmassnahmen

4.1 Grundsätzliches

Es wird angenommen, dass mit dem Inkrafttreten der neuen Konzession die SBB das Willerzeller-Viadukt an den Kanton Schwyz und den Bezirk Einsiedeln abtreten werden. Vor einer solchen Übertragung der Bauwerkseigentümerschaft wird üblicherweise das Bauwerk von der bisherigen Eigentümerschaft instandgesetzt. Möglicherweise wurde dies in der bisherigen Konzession so festgelegt. Eine Instandsetzung beinhaltet gemäss Ziffer 3.6 der Norm SIA 469²⁴ und Ziffer 1.1 der Norm SIA 260²⁵ die Wiederherstellung der Sicherheit, Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit für eine vereinbarte Nutzungsdauer. Instandsetzungen führen zu keiner Veränderung der Nutzungsmöglichkeiten.

Da es sich bei einer Instandsetzung eines Bauwerks um Eingriffe grösserem Ausmasses handelt, ist es oft zweckmässig, gleichzeitig auch Veränderungen vorzunehmen zwecks Anpassung an moderne Nutzungsanforderungen wie z.B. für das Willerzeller-Viadukt eine Verbreiterung der Fahrbahnplatte oder eine Anpassung der Tragfähigkeit (Verstärkung) für höhere Strassenlasten, die langfristig (über die nächsten 80 Jahre) vorgesehen sind. Eine Veränderung (Anpassung, Verbreiterung) des Viadukts ist im Sinne der Ziffer 3.7 der Norm SIA 469 als Investition zu betrachten, welche von der neuen Bauwerkseigentümerschaft zu tragen wäre.

4.2 Anforderungen für die künftige Nutzung

Nachfolgend werden drei Strategien von Erhaltungsmassnahmen entwickelt:

- O: Instandhaltung mit regelmässigen Massnahmen
- A: Vollständige Instandsetzung
- B: Erneuerung mit Verbreiterung.

Für alle drei Strategien gelten folgende Anforderungen im Sinne der Norm SIA 269: 1) Nutzungsdauer von 80 Jahren (entspricht vermutlich der Dauer der neuen Konzession für das Etzelwerk), 2) Einhalten der Anforderungen an eine genügende Tragsicherheit und Gebrauchstauglichkeit, 3) Verhältnismässigkeit der Erhaltungsmassnahmen. Die Wirtschaftlichkeit der drei Szenarien könnte mit der Barwertmethode (wie bei SBB und ASTRA üblich) untersucht werden.

4.3 Strategie 0: Instandhaltung mit regelmässigen Massnahmen

Diese Strategie hat zum Ziel, beschädigte Bauteile erst dann wiederherzustellen (durch Reparatur, Instandsetzung oder Auswechseln), wenn es zur Bewahrung der Gebrauchstauglichkeit und Tragsicherheit des Viadukts notwendig und wirtschaftlich ist. Diese Strategie würde über die gesamte künftige Nutzungsdauer umgesetzt werden und beinhaltet einfache und regelmässige Massnahmen. Diese Strategie entspricht dem bisherigen Vorgehen²⁶ und behält die bisherige Nutzung mit einer nur 4.5m breiten Strassenfläche auf dem Viadukt bei. Sie bringt keinen Mehrwert für die Benutzer.

Aufgrund des heutigen Zustands sind gemäss dieser Strategie für das Viadukt folgende Erhaltungsmassnahmen über die nächsten 30 Jahre voraussehbar:

- Kurzfristig (in den nächsten Jahren): 1) Wiederherstellung des Korrosionsschutzanstrichs für alle Flächen, wo der Anstrich nicht mehr existiert. Dies betrifft vor allem die korrodierenden Stahlbauteile der Gerbergelenke und die Pfeilerbereiche, die bei niedrigem Wasserstand zum Vorschein kommen. 2) Abdichtung der Fahrbahnübergänge (Auswechseln der Fugenbänder).
- Mittelfristig (in 10 bis 15 Jahren): 1) Erneuerung von Belag und Abdichtung sowie Instandsetzung der Randabschlüsse. 2) Wiederherstellung Anstrich der Geländer.

Aufgrund der Erfahrungen weisen diese Erhaltungsmassnahmen eine beschränkte Wirkungsdauer auf und müssten schätzungsweise alle 20 Jahre wiederholt werden.

²⁴ Norm SIA 469 Erhaltung von Bauwerken, Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein, Zürich, 1997.

²⁵ Norm SIA 260 Grundlagen der Projektierung von Tragwerken, Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein, Zürich, 2013.

²⁶ Dieses Vorgehen ist bei der Erhaltung von Infrastrukturbauten nach wie vor üblich, obwohl es nicht wirtschaftlich ist. Man könnte das Vorgehen auch als « Feuerwehr-Strategie » bezeichnen.

Die Kosten für diese Erhaltungsmassnahmen können aufgrund der bisher am Viadukt ausgeführter Arbeiten und von Erfahrungswerten abgeschätzt werden. Die Finanzierung der Erhaltungsmassnahmen über die nächsten 30 Jahre wäre zwischen der früheren Eigentümerschaft (SBB) und der neuen Eigentümerschaft (Kanton und Bezirk) aufzuteilen, da gemäss dieser Strategie in den kommenden Jahren Ausgaben auflaufen werden, die noch auf Schädigungsprozesse aus den ersten 80 Jahren Nutzungsdauer zurückzuführen sind.

4.4 Strategie A: Vollständige Instandsetzung

4.4.1 Ziel und Erhaltungsmassnahmen

Diese Strategie hat zum Ziel, das Viadukt umfassend und gründlich instandzusetzen, um die Dauerhaftigkeit, Tragsicherheit und Gebrauchstauglichkeit für eine nächste lange Nutzungsdauer (von 80 Jahren) wiederherzustellen und zu garantieren ohne unvorhergesehenen Aufwand für den Unterhalt. Die bisherige Nutzung mit einer nur 4.5m breiten Strassenfläche auf dem Viadukt wird beibehalten. Diese Strategie bringt keinen Mehrwert für die Benutzer.

Diese Strategie sieht Erhaltungsmassnahmen grösseren Ausmasses vor und beinhaltet folgende Arbeiten, die vor dem Jahr 2022, also vor Übergabe der Eigentümerschaft, erfolgen (Bild 10):

- vollständige Erneuerung des Korrosionsschutzanstrichs der gesamten Stahlkonstruktion
- dauerhafte, robuste Abdichtung und Verstärkung der Fahrbahnplatte durch eine Schicht aus UHFB
- Umbau (Verstärkung und dauerhafte Abdichtung) der Gerbergelenke sowie Reparatur der stark durch Korrosion beschädigten Stahlbauteile
- Instandsetzung oder Erneuerung von Ausrüstungsteilen wie Entwässerung, Leitungen und Geländer.

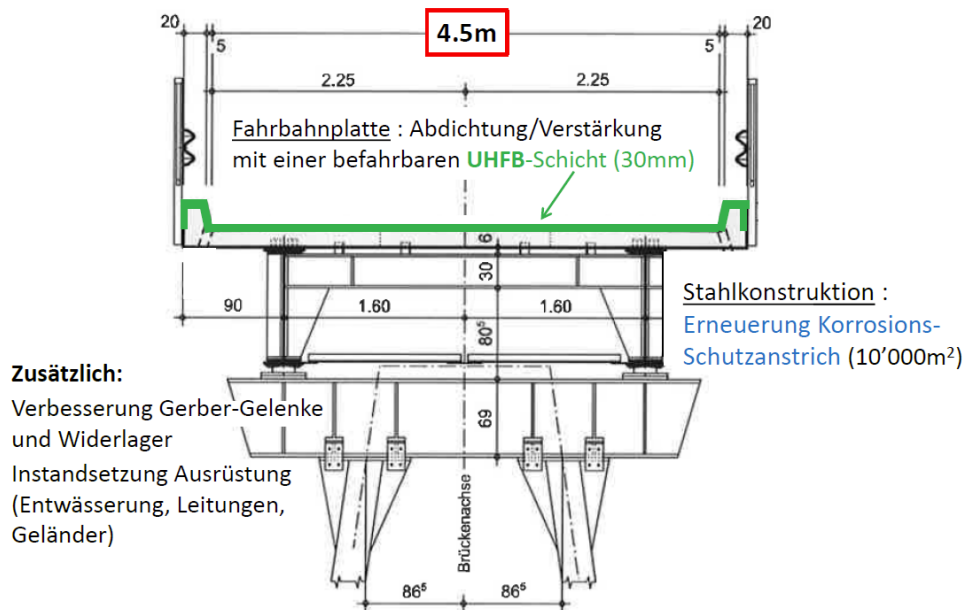


Bild 10. Strategie A – Vollständige, gründliche Instandsetzung

4.4.2 Erneuerung des Korrosionsschutzanstrichs

Die Erneuerung des Korrosionsschutzanstrichs erfolgt nach dem heutigen Stand der Baukunde mit einer Beschichtung der Klasse C5-M. Nach der vollständigen Entfernung des bestehenden Anstrichs durch Sandstrahlen in einer dichten Einhausung (Klasse 1) wird die gesamte Stahlkonstruktion beschichtet mit einer Grundbeschichtung aus Zinkstaub ($80\mu\text{m}$ Schichtstärke), einer Zwischenbeschichtung aus Eisenglimmer ($240\mu\text{m}$) und einer Deckbeschichtung ($60\mu\text{m}$), was eine Gesamtschichtstärke des neuen Anstrichs von $400\mu\text{m}$ ergibt.

Die Korrosionsschutzarbeiten des Überbaus und Pfeilerjochs (Kopfbereich) erfolgen von einem fahrbaren Gerüst aus (Bild 11a); dabei bleibt das Viadukt für einen Verkehrsstreifen offen, der durch Ampelbetrieb alternierend in beide Fahrtrichtungen genutzt wird. Die Pfeiler werden bis 1m unterhalb des tiefsten Wasserstands behandelt. Diese Arbeiten finden bei möglichst tiefem Wasserstand statt. Eventuell ist ein ausserordentliches Absenken des Seespiegels eine Option.

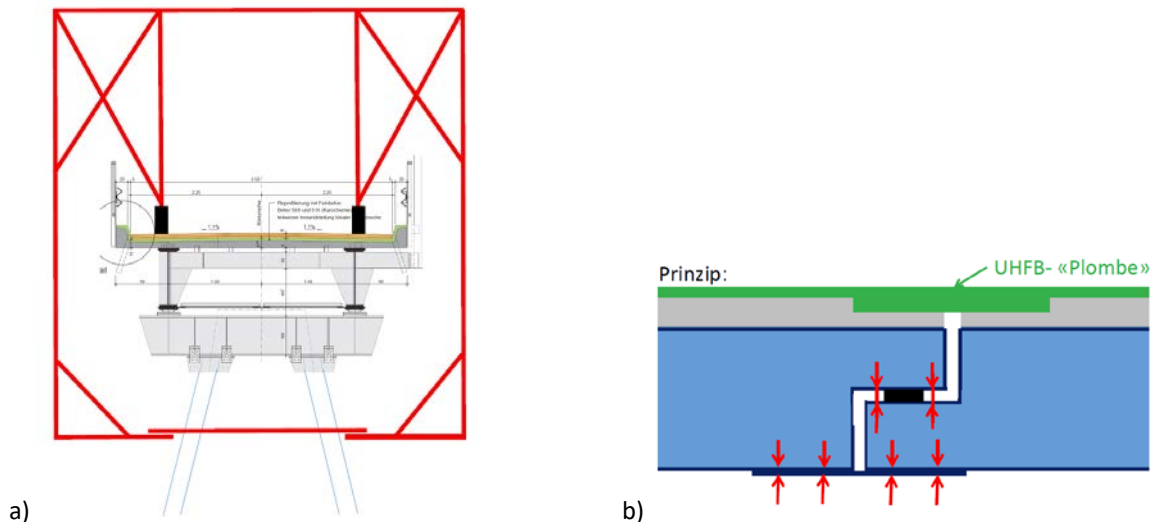


Bild 11. a) fahrbares Gerüst mit Einhausung für die Korrosionsschutzarbeiten des Überbaus und Pfeilerkopfbereiche; b) Prinzip des kraftschlüssigen Verschlusses des festen Auflagers des Gerberträgers.

Da die Erneuerung des Korrosionsschutzanstrichs die grössten Kosten der Instandsetzung verursachen, wurde bei einer spezialisierten Firma eine Richtofferte eingeholt. Die geschätzten Gesamtkosten von 6.5 Millionen CHF (ohne MWST)²⁷ setzen sich wie folgt zusammensetzen: Baustelleninstallation 0.5 Mio.CHF, fahrbares Gerüst 1.0, Sandstrahlen Überbau 0.95, Beschichtung Überbau 1.2, Pfeiler (Strahlen, Anstrich) 2.85.

4.4.3 Ertüchtigung der Fahrbahnplatte mit bewehrtem UHFB

Die Oberseite der Fahrbahnplatte aus Stahlbeton wird mit einer 30mm starken Schicht aus UHFB abgedichtet und dort, wo allenfalls ein Schaden infolge Bewehrungskorrosion vorliegt, verstärkt. UHFB steht für «Ultra-Hochleistungsfähiger FaserverbundBaustoff», der aus Zement und anderen pulverförmigen Stoffen, harten Partikeln (z.B. Quarz) feiner Körnung (<1 mm), Wasser (W/Z-Wert 0.15), Zusatzmittel (Hochleistungsverflüssiger) und einer sehr grossen Menge (250 kg/m³) Kurzfasern (Länge 15 mm, Durchmesser 0.2 mm) aus Stahl zusammengesetzt ist. Durch seine optimierte, hohe Packungsdichte ist UHFB flüssigkeitsdicht. Die Zugfestigkeit von UHFB ist höher als 10 MPa und sein Verhalten unter Zugspannungen ist elastisch-plastisch; die Druckfestigkeit ist höher als 150 MPa.

Diese Baustoffeigenschaften beinhalten ein bedeutendes Potential für die Abdichtung und Verstärkung von Betonbauten, das an der ETH Lausanne seit 1999 erforscht²⁸ und für die Anwendung entwickelt wird. Die UHFB-Technologie wurde in der Schweiz seit 2004 an zahlreichen Bauwerken, vor allem in der Westschweiz, umgesetzt²⁹. Die von den Ausmassen her grösste Anwendung war die Verstärkung des 2.1 km langen, 45 Jahre alten Chillon-Autobahnviadukts in den Jahren 2014 und 2015 (Bild 12)³⁰.

Im Kanton Schwyz wird die UHFB-Technologie 2017-2019 für die Ertüchtigung der Autobahnviadukte Boli, Linden und Mettlen³¹ mit einer Gesamtlänge von rund 1.0 km zwischen Arth und Küsnacht angewendet. Wichtige Gründe für die Anwendung dieser Technologie sind vergleichsweise geringe Baukosten, vereinfachte und beschleunigte Bauabläufe und wenig invasive Eingriffe. Die UHFB-Technologie ist im Merkblatt SIA 2052 «UHFB – Baustoffe, Bemessung und Ausführung»³² geregelt.

²⁷ Im Bericht von Flückiger+Bosshard werden für eine vollständige Erneuerung des Korrosionsschutzanstrichs Gesamtkosten von 3.5 Millionen CHF angegeben. Dieser Betrag erscheint als sehr gering und erklärt sich durch eine grobe Unterschätzung der zu behandelnden Flächen.

²⁸ 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.

²⁹ Der Verfasser dieses Gutachtens wirkt und wirkte bei mehr als 50 Projekten des Brücken- und Hochbaus als Berater mit bei Fragen des Verstärkungskonzepts, der Bemessung und Qualitätsüberwachung während der Ausführung.

³⁰ Mühlberg, H., Cuennet, S., Brühwiler, E., Houriet, B., Fleury, B., Boudry, F., Chillon-Viadukte – Mit Leichtigkeit verbessern, Tec21 Nr. 47, 21 November 2014, S. 23-26.

³¹ Der Verfasser dieses Gutachtens hat das Konzept für die Ertüchtigung dieser Autobahnviadukte erarbeitet und begleitet das Bauprojekt und die Ausführung als Berater für das ASTRA.

³² Merkblatt SIA 2052 UHFB – Baustoffe, Bemessung und Ausführung, SIA Zürich, 1.3.2016.



Bild 12. Einbau von Frisch-UHF mit einem Fertiger auf dem Chillon-Viadukt bei Montreux (Fotos: August 2014).

Die Fahrbahnplatte des Willerzeller-Viadukts wird mit der UHF-Technologie wie folgt dauerhaft ertüchtigt: Der Belag und die Abdichtungsfolie werden abgetragen, damit die Betonoberfläche der Fahrbahnplatte mit Hochdruckwasser (HDW) behandelt und für den Einbau des Frisch-UHF vorbereitet werden kann. Es erfolgt ein HDW-Abtrag von etwa 10mm Beton; in Zonen mit Schäden infolge Bewehrungskorrosion wird der Beton bis in die erforderliche Tiefe abgetragen. Der Einbau der 30mm starken UHF-Schicht (Regelschichtstärke) erfolgt maschinell mit einem Fertiger, der die gesamte Breite von 4.5m bearbeiten würde. Die für die gesamte Viaduktfläche von rund 5'000 m² sind rund 150 m³ UHF erforderlich, die in maximal 3 Tagen eingebaut werden können.

Die UHF-Oberfläche kann mit einer Profilierung versehen werden, um die erforderliche Griffigkeit der Fahrbahnoberfläche herzustellen; es kann aber auch herkömmlich eine nur 4 cm starke Asphaltsschicht (mit Haftvermittler zum UHF Untergrund) als Belagsschicht eingebaut werden, womit die Eigenlasten des Viadukts insgesamt nicht erhöht werden.

Das Bauprogramm kann derart gestaltet werden, dass eine vollständige Ausserbetriebnahme des Viadukts auf maximal 28 Tage begrenzt werden kann.

Aufgrund bisheriger Erfahrungen werden für den UHF-Einbau, inklusive HDW und Bearbeitung der Randabschlüsse, Kosten von 300 bis 350 CHF/m² Fahrbahnfläche oder 1.5 – 1.75 Millionen CHF (ohne MWSt) geschätzt.

4.4.4 Umbau der Gerbergelenke

Da die Gelenkkonstruktionen der 7 Gerberträger mit den Dilatationsfugen in der Fahrbahn hinsichtlich der Dauerhaftigkeit immer problematisch waren und bisher zu den grössten Unterhaltskosten führten, müssen diese konstruktiven Details verbessert werden. Dabei ist zwischen der festen und der beweglichen Auflagerkonstruktion des Gerberträgers zu unterscheiden:

- Festes Auflager: Das in Bild 11b dargestellt Prinzip sieht vor, die Stahlbauteile der Gelenkkonstruktion kraftschlüssig zu verbinden und die Fahrbahnplatte mit einer etwa 150mm starken, mit Betonstahlbewehrung versehenen UHF-Schicht, die wie eine robuste «Plombe» wirkt, ebenfalls kraftschlüssig zu verschliessen.
- Bewegliches Auflager: Es ist ein Dilatationsweg von +-30mm aufzunehmen, der eine Dilatationsvorrichtung ähnlich der bestehenden Konstruktion erforderlich macht. Die bestehende Fugenkonstruktion ist eventuell zu ersetzen. Herkömmliche Systeme könnten zusätzlich mit einer Vorrichtung zur Auffangung des Wassers, das durch die nur unzuverlässig dichten Fugenkonstruktion dringen könnte, verbessert werden, um so die direkte Beaufschlagung der darunterliegenden Stahlkonstruktion zu verhindern.

Bei diesen Arbeiten sind allfällig durch Korrosion stark beschädigte Stahlbauteile zu ergänzen oder zu ersetzen.

Die Kosten für den Umbau der 2 x 7 Gerbergelenke betragen schätzungsweise durchschnittlich 35'000 CHF (20'000 für das feste Auflager, 50'000 für das bewegliche Auflager) oder 500'000 CHF für das Viadukt.

Bemerkung: Es ist zu untersuchen, ob eine Änderung des Lagerungskonzepts und des statischen Systems des Viadukts technisch möglich und wirtschaftlich ist, indem alle Gerbergelenke kraftschlüssig verschlossen werden und der Dilatationsweg von +-140mm mit einem Fahrbahnübergang (bewegliches Auflager mit Dilatationsfuge) an den beiden Widerlagern aufgenommen werden kann. Dadurch könnte die Anzahl Fahrbahnübergängen von heute 16 auf 2 verringert werden.

4.4.5 Ausrüstungsteile

Das bestehende System zur Entwässerung der Fahrbahn ist «pragmatisch». Auf der Nordseite des Viadukts ist eine Leitung angehängt. Das Geländer des Viadukts ist noch im ursprünglichen Zustand und wurde 1994 neu gestrichen und mit einer Leitplanke versehen. Diese Ausrüstungsteile sind möglicherweise zu erneuern oder zu verändern, um den heutigen Anforderungen zu genügen.

4.4.6 Kosten und Finanzierung

Für die Strategie A mit einer umfassenden Instandsetzung des Viadukts fallen folgende Kosten an:

- Erneuerung des Korrosionsschutzes 6.5 Mio CHF
- Ertüchtigung der Fahrbahnplatte 1.7 Mio CHF
- Umbau Gerbergelenke 0.5 Mio CHF
- Ausrüstungsteile 0.3 Mio CHF

Total: **9.0 Mio CHF** (ohne MWSt)

Die gesamte nutzbare Viaduktfläche beträgt 5'000m², was einen Quadratmeterpreis von 1'800 CHF ergibt, wobei rund 2/3 der Kosten zu Lasten der Erneuerung des Korrosionsschutzes gehen. Diese Kosten sind deutlich tiefer als die Kosten für einen Ersatzneubau, für den man schätzungsweise 3'000 – 4'000 CHF/m² (ohne die Kosten für Provisorien zur Bewältigung des Verkehrs während der Ausführung) ansetzen müsste.

Gemäss dieser Strategie A müssten die Aufwendungen für die umfassende Instandsetzung durch die bisherige Eigentümerschaft getragen werden. Die vergleichsweise geringen Aufwendungen für den planbaren Unterhalt wären durch die neue Eigentümerschaft aufzubringen.

4.5 Strategie B: Erneuerung mit Verbreiterung

4.5.1 Ziel und Erhaltungsmaßnahmen

Diese Strategie hat zum Ziel, das Viadukt umfassend instanzzusetzen, um die Dauerhaftigkeit, Tragsicherheit und Gebrauchstauglichkeit für eine nächste lange Nutzungsdauer und bei vorhersehbaren Einwirkungen (Strassenlasten) ohne unvorhergesehenen Aufwand für den Unterhalt wiederherzustellen. Zusätzlich wird die Fahrbahnfläche auf 5.5m verbreitert, um ein komfortableres Kreuzen der Fahrzeuge zu ermöglichen. Diese Strategie bringt eine Anpassung an neue Anforderungen und somit einen Mehrwert für die Benutzer.

Diese Strategie beinhaltet folgende Arbeiten, die in den nächsten Jahren (Bild 13):

- vollständige Erneuerung des Korrosionsschutzanstrichs der gesamten Stahlkonstruktion (gleich wie 4.4.2)
- dauerhafte Abdichtung und Verstärkung der Fahrbahnplatte durch eine Schicht aus bewehrtem UHFB
- Umbau (Verstärkung und dauerhafte Abdichtung) der Gerbergelenke sowie Reparatur der stark durch Korrosion beschädigten Stahlbauteile (gleich wie 4.4.4)
- Instandsetzung oder Erneuerung von Ausrüstungsteilen (gleich wie 4.4.5).

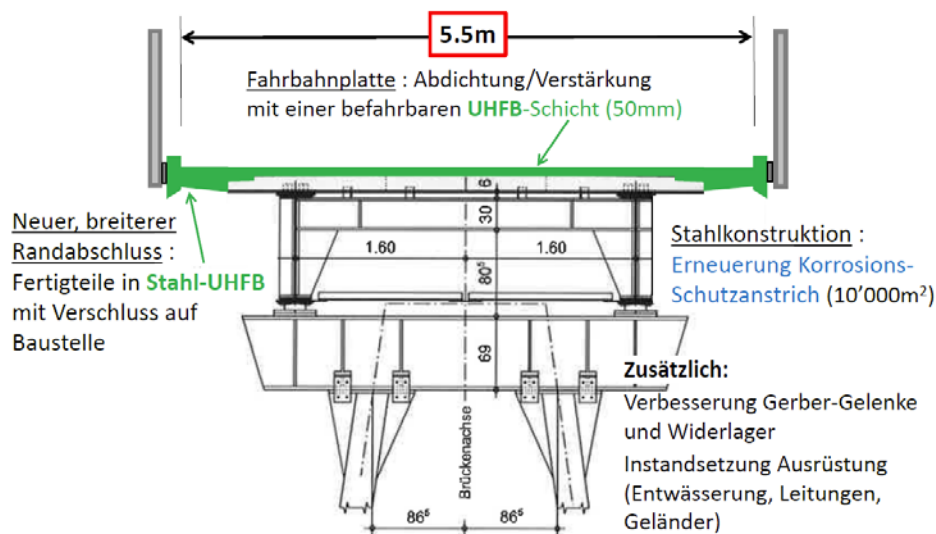


Bild 11. Strategie B – Erneuerung mit Verbreiterung der Fahrbahn auf 5.5m.

4.5.2 Abdichtung und Verbreiterung der Fahrbahnplatte mit bewehrtem UHFB

Ähnlich wie unter 4.4.3 beschrieben wird die Oberseite der Fahrbahnplatte aus Stahlbeton mit einer UHFB-Schicht abgedichtet und verstärkt, um die zusätzliche Beanspruchung durch die breitere Fahrbahnplatte aufzunehmen. Dazu ist eine 40mm starke UHFB-Schicht erforderlich, die in Querrichtung mit einer Betonstahlbewehrung versehen ist. Die Verbreiterung wird durch vorfabrizierte, leichte Konsolelement aus bewehrtem UHFB (Stahl-UHFB) realisiert; diese Elemente werden mit einer entsprechenden Anschlussbewehrung kraftschlüssig mit dem vor Ort eingebauten UHFB der Platte verbunden. In Längsrichtung werden die vorfabrizierten Konsolelemente vor Ort mit Frisch-UHFB monolithisch und flüssigkeitsdicht verbunden, sodass keine Fugen entstehen.

Wiederum kann die UHFB-Oberfläche mit einer Profilierung versehen werden, um direkt auf der UHFB-Fläche zu fahren. Alternativ kann auch eine 4cm starke Asphaltsschicht als Fahrbelag eingebaut werden. Die Eigenlasten des Viadukts werden nur geringfügig erhöht.

Die geschätzten Kosten für die Herstellung der vorfabrizierten Konsolen betragen 700 CHF pro Laufmeter, was für das gesamte Viadukt einen Betrag von 1.6 Millionen CHF ergibt. Für den UHFB-Einbau vor Ort, inklusive HDW, werden Kosten von 300 CHF/m² Fahrbahnfläche oder 1.85 Millionen CHF geschätzt. Die Gesamtkosten für die verbreiterte Fahrbahnplatte betragen schliesslich rund 3.5 Mio. CHF.

4.5.3 Kosten und Finanzierung

Für die Strategie B mit einer Verbreiterung des Viadukts auf 5.5 m betragen die geschätzten Baukosten:

- Erneuerung des Korrosionsschutzes 6.5 Mio CHF
- Verbreiterung der Fahrbahnplatte 3.5 Mio CHF
- Umbau Gerbergelenke 0.5 Mio CHF
- Ausrüstungsteile 0.3 Mio CHF

Total: **10.8 Mio CHF** (ohne MWSt)

Die gesamte nutzbare Fahrbahnfläche beträgt neu 6'100 m², was einen Quadratmeterpreis von 1'770 CHF ergibt. Diese Kosten sind wiederum deutlich tiefer als die Kosten für einen Ersatzneubau.

Gemäss dieser Strategie B müssten die Aufwendungen für die Erhaltung der bisherigen Werte durch die bisherige Eigentümerschaft beglichen werden. Die Aufwendungen für den Mehrwert der breiteren Fahrbahnplatte (etwa 2 Millionen CHF) wären durch die neue Eigentümerschaft zu tragen.

4.5.4 Erhöhung der Kapazität für Strassen- und Langsamverkehr

Das Willerzeller-Viadukt wird heute und mittelfristig von einem eher bescheidenen Strassenverkehr genutzt. Bei den bisherigen Betrachtungen wurde davon ausgegangen, dass dafür eine gegenüber den Normanforderungen reduzierte Fahrbahnbreite von bisher 4.5m oder neu 5.5m für den Strassenverkehr genügend ist. Jedoch würde die Situation für den Langsamverkehr (Radfahrer) unbefriedigend bleiben.

Folglich stellt sich die Frage, ob das bestehende Viadukt im Hinblick auf eine Erhöhung der Kapazität für einen deutlich grösseren Strassen- und Langsamverkehr auf 6.5m verbreitert werden kann ?

Eine Verbreiterung der Fahrbahnplatte auf 6.5m für einen «normgerechten» Strassenverkehr im Gegenverkehr und für erhöhte Strassenlasten gemäss der Neubaunorm SIA 261, die jegliche denkbaren zukünftigen Strassenlasten abdecken, ist technisch möglich. Dazu wäre der Biegetragwiderstand des Überbaus über den Stützen mit einer 80mm dicken, mit Betonstahl (in Längsrichtung) stark bewehrten UHFB-Schicht in der Fahrbahnplatte zu erhöhen; zudem müsste der Druckgurt der Stahlträger verstärkt werden. (Ein ähnliches Verstärkungskonzept wird bei den Autobahnviadukten zwischen Arth und Küssnacht umgesetzt.) Demnach würde in Zukunft das Strassenviadukt weiterhin nur durch den Strassenverkehr genutzt werden können.

Für den Langsamverkehr wäre es zweckmässig und im Sinne der Nutzung des Potentials der Region Sihlsee als Erholungsgebiet sehr attraktiv, parallel zum Strassenviadukt einen Steg für Radfahrer und Wanderer zu bauen. Ein solcher Steg könnte durch Sponsoren und Nutzer zumindest teilfinanziert werden, wie bei ähnlichen, bereits ausgeführten Vorhaben, z.B. der Panoramaweg um den Thunersee mit zwei Hängebrücken von 340m und 144m Länge oder die 110m lange Hängebrücke als «peak walk» zwischen zwei Gipfeln des Scex Rouge Bergs oberhalb Les Diablerets VD.

Ein entsprechendes Projekt wurde kürzlich vom Einsiedler Ingenieur Edgar Kälin zusammen mit einer privaten Trägerschaft erarbeitet; es handelt sich um einen 1'260m langen Holzsteg – als längste Holzbrücke der Welt –, der zusätzlich mit 3'400 m² Solarpanels versehen würde³³.

Eine Aufteilung von Strassenverkehr und Langsamverkehr auf je ein Viadukt wäre die für die Verkehrsteilnehmer attraktivere und kostengünstigere Option als ein neuer Viadukt (mit Baukosten von geschätzten 86 Millionen CHF), der wie beim Steinbachviadukt beide Verkehrsteilnehmer auf der gleichen Fahrbahnplatte vereinen würde.

5 Folgerungen und Empfehlung

1. Das Willerzeller-Viadukt weist wesentliche kulturelle und materielle Werte auf und ist Teil der erforderlichen Infrastruktur zur weiteren Entwicklung der Region Sihlsee.
2. Der heutige Zustand der Viaduktkonstruktion ist annehmbar bis gut. Die Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit genügen den heute gültigen Normen.
3. Das Willerzeller-Viadukt kann im Hinblick auf eine nächste lange Nutzungsdauer (von 80 Jahren) ertüchtigt werden. Dazu wurden drei Szenarien entwickelt, die auf künftige Nutzungsanforderungen reagieren. Die Aufwendungen für die Erhaltungsszenarien sind verhältnismässig und deutlich geringer als für einen Ersatzneubau.

Im Sinne einer zukunftsgerichteten Lösung wird empfohlen, die Strategie B «Erneuerung mit Verbreiterung» bevorzugt weiterzuverfolgen und die unter 4.5.4 dargelegte Option zur Erhöhung der Kapazität für Strassen- und Langsamverkehr detaillierter zu untersuchen.

EPFL Lausanne, den 6. Juni 2017



Prof. Dr. Eugen Brühwiler, dipl. Ing. ETH/SIA/IABSE

³³ Ingenieurbüro Edgar Kälin AG Einsiedeln: Holzsteg über den Sihlsee, Machbarkeitsstudie, 4.2.2017.