

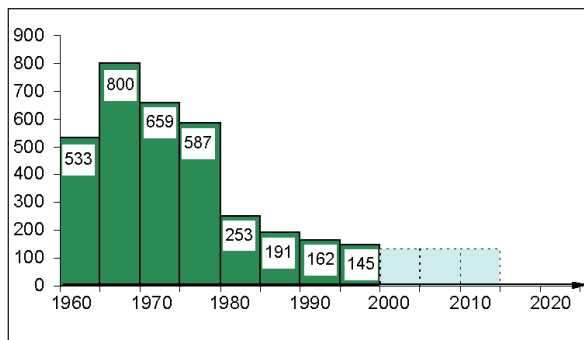


**Bauwerkserhaltung**

**Conservation  
des ouvrages**

**Conservation  
of structures**

Jean-Pierre Joris



Anzahl erstellter Brücken in 5-Jahres-Perioden.  
Number of bridges build in a 5-year-period.

## Einführung

Das Nationalstrassennetz ist gegenwärtig etwa 1650 km lang. Es enthält etwa 3350 Brücken und 200 Tunnels sowie eine grosse Anzahl weiterer Kunstbauten wie Galerien, Durchlässe, Stützmauern und Schutzbauwerke.

Der Bau der Nationalstrassen gehört seit 1960, deren Unterhalt seit 1985 zur Aufgabe des Bundes. Gemäss Bundesverfassung sind die Nationalstrassen ein Gemeinschaftswerk des Bundes und der Kantone, der Bund übernimmt im Mittel 85% der Kosten für Bau und Unterhalt, den Rest übernehmen die Kantone, die auch Eigentümer und Bauherren sind. Dem Bund obliegt die Oberaufsicht. Mit zunehmendem Alter müssen immer mehr Objekte instand gesetzt werden. Diese Arbeiten erzeugen erhebliche Kosten. Diese Aufwendungen fallen beim Betreiber als Bau-, Projektierungs-, Bauleitungs- und Verkehrslenkungs-kosten an. Beim Benutzer fallen die Kosten in erster Linie als Staukosten an; weitere Kosten entstehen infolge Umleitungen, Langsamfahrten und Unfällen. Die Kosten Dritter infolge Immissionen sind im Vergleich zu den Betreiber- und Benutzerkosten gering.

Mit dem zunehmenden Verkehr und dem Druck auf die öffentlichen Finanzen wächst die Forderung nach effizientem Einsatz der Mittel. Deshalb hat sich das

Bundesamt für Strassen (ASTRA) vorgenommen, den Unterhalt gesamtwirtschaftlich zu optimieren, d.h. die Gesamtaufwendungen der Betreiber, Benutzer und von Dritten sollen minimiert werden. Je grösser eine Bauwerkspopulation ist, desto mehr ist man auf computerunterstützte Entscheidungsfindung angewiesen. Aus diesen Gründen sind beim ASTRA seit einigen Jahren Bemühungen im Gange, diese Werkzeuge zu entwickeln. Für die Kunstbauten, von denen die Brücken den wichtigsten Teil bilden, ist die Entwicklung von KUBA-MS (KunstBAuten-Management-System) im Gange. Unter der Bezeichnung KUBA-MS-Ticino steht ein Prototyp zur Verfügung.

## Grundlagen

Jedes Planungswerkzeug für den Unterhalt muss neben den Zielvorgaben weitere Grundlagen haben: Bestandesinventar, Zustandsdaten, Zerfallsprozesse, Kostendaten usw. Ferner müssen die zur Verfügung stehenden Finanzen bekannt sein. Damit und mit Algorithmen kann ein optimales Unterhaltsprogramm erarbeitet werden. Bei begrenztem Budgetrahmen können die Zustandsentwicklung und die aufgeschobenen Ausgaben bestimmt werden. Wird der Budgetrahmen nicht begrenzt, ergeben sich langfristig die minimalen Kosten.

Um bei Strassen die Benutzerkosten bestimmen zu können, muss einerseits das Verkehrsaufkommen (DTV, Anteil Schwerverkehr) und die Strassenkapazität bekannt sein, andererseits müssen auch hier Algorithmen zur Kostenermittlung zur Verfügung stehen.

## Vorgehen im ASTRA

Das ASTRA ging bei seinen Bemühungen pragmatisch vor. Wie überall bestand das erste Bedürfnis in der Kenntnis über die vorhandene Substanz und deren Zu-

## Introduction

The national motorway network is currently around 1,650 kilometres in length. It includes approximately 3,350 bridges and 200 tunnels, plus a large number of other engineering structures such as galleries, passages, support walls and protective structures. Since 1960 the Swiss national motorway has been constructed under the responsibility of the federal government, and since 1985 the latter has also been responsible for its maintenance. The Federal Constitution states that motorways are the joint concern of the federal government and the cantons: on average, the government covers around 85% of the costs relating to construction and maintenance, while the cantons – which are simultaneously its proprietors and developers – are responsible for the remainder. The federal government is the chief supervisory authority. As the years go by, an ever-increasing number of objects need to be refitted, and these tasks are associated with considerable expenditure that has to be borne by the operator in the form of construction, planning, site management and traffic diversion costs. As far as road users are concerned, these costs primarily take the form of lost time in traffic jams, while other expenses arise as the result of diversions, longer travel times and accidents. In comparison with those incurred by the operator and road users, third-party costs resulting from emissions are fairly low.

As traffic volumes continue to increase and public funds come under ever greater pressure, the need to use the available funds in a cost-effective manner also grows more urgent. For this reason, the Swiss Federal Roads Authority intends to optimise the maintenance of the motorway network, i.e. to minimise the overall costs to the operator, road users and third parties. The larger

stand. Die Unterstützung der Brückeningenieurere für die Überwachung der Kunstbauten sowie die Visualisierung der Bauwerke und deren Zustand stellen weitere Nutzungsmöglichkeiten dar. Der grösste Nutzen entsteht, wenn man die Daten zur mittel- und langfristigen Planung der Erhaltung nutzt.

#### **KUBA-DB**

Das ist die Datenbank des ASTRA. Bei der Entwicklung stand zuerst der Inventargedanke Pate, die weiteren Bedürfnisse folgten später. Mit der heute zur Verfügung stehenden Version 3.0 können alle erfassten Kunstbauten mit ihrem Zustand in Tabellen und auf Landkarten dargestellt und Bauwerkshefte mit allen erfassten Daten eines Objektes erstellt werden.

Die Tabellen enthalten alle in vordefinierten oder frei gewählten Filtern vorbestimmten Daten, z.B. Eigentümer, Lokalisation, Bauwerksart usw. Analog können Tabellen über ein einzelnes Bauwerk und seinen Inspektionen erstellt werden, mit Angabe des Zustandes der Bauwerksteile.

Auf Landkarten werden ebenfalls die nach Filtern gewählten Bauwerke mitsamt ihrem Zustand dargestellt.

Mit KUBA-DB lassen sich somit ausser der Terminierung von Inspektionen keine eigentlichen Planungsaufgaben durchführen, aber falls die Daten vollständig erfasst werden, ist sie eine gute Basis für weitere Management-Aufgaben. Bereits mit der in Entwicklung stehenden Version 3.1 werden zu diesem Zweck Anpassungen durchgeführt, weitere Ergänzungen werden spätestens mit der Einführung des eigentlichen Planungswerkzeuges KUBA-MS 1.0 nötig.

#### **KUBA-MS**

KUBA-MS bedeutet KUNstBAuten-Management-System. Es soll auf der Basis von Daten aus KUBA-DB den Kantonen und dem ASTRA die mittel- und langfristige Planung der Erhaltung ermöglichen.

*the number of structures to be managed, the greater the need of computer-based decision-making processes. In view of this, the Swiss Federal Roads Authority has been actively developing suitable tools for a number of years now; one of which is intended for use in the engineering structures segment, in which bridges form the most important component. It is called KUBA-MS, which stands for «KUNst-BAuten-Management-System» (Structures Management System), and a prototype called «KUBA-MS-Ticino» is currently available.*

#### **Principles**

*In addition to its overlying purpose, every maintenance planning tool also has to process other fundamental data such as inventories, condition of each structure, deterioration processes, costs, etc. Furthermore, we have to know how much funding is available. With the aid of algorithms we can then define an optimised maintenance programme. If the scope of the budget is limited, we can determine the current condition of the various structures and the deferred expenditure. If the scope is not limited, this results in the minimum costs over the long-term.*

*In order to determine the costs relating to road users, we need to have data-concerning traffic volumes (daily traffic volume, proportion of heavy goods vehicles) and road capacity, as well as algorithms for calculating the relevant costs.*

#### **Procedure**

*The Swiss Federal Roads Authority adopted a pragmatic approach. The first need consisted in acquiring information concerning the existing structures and their current condition. Support for bridge engineers in their task of inspecting motorway structures, and the ability to depict the various objects and their current condition in graphic form, are other potential benefits. The greatest benefit arises when we use the data for*

*the purpose of medium-term to long-term maintenance planning.*

#### **KUBA-DB**

*This is the Swiss Federal Roads Authority's engineering structures database. The initial idea was to develop an inventory tool, and its extension to include other functions only followed at a later stage. With the version we have at our disposal today (3.0), we can display all the recorded structures and their condition in table and map form, as well as produce dossiers containing all the stored information about a given object. The tables contain all predefined data (using preconfigured or freely selected filters), e.g. proprietor, location, type of structure, etc. And in the same way it is possible to produce tables concerning a given structure and the dates on which it has been inspected, including details regarding its components and condition.*

*We can also depict selected structures on maps (together with information about their condition), again with the aid of filters.*

*With the exception of preparing inspection schedules, we cannot use KUBA-DB for actual planning purposes, but assuming that data have been entered in their entirety, this tool forms a sound basis for other management tasks. We are already making the necessary adjustments for this purpose in Version 3.1, which is currently in preparation, and a number of additional modifications will become necessary when we introduce our own planning tool, KUBA-MS 1.0.*

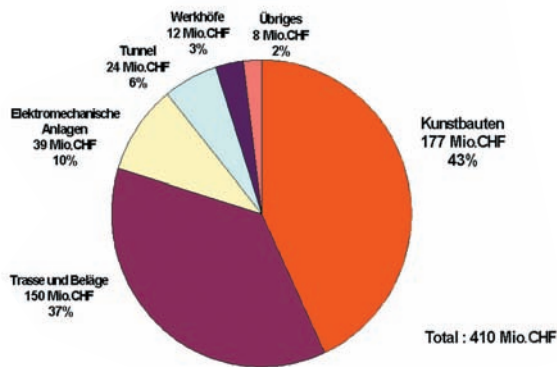
#### **KUBA-MS**

*KUBA-MS stands for KUNstBAuten-Management-System (Bridge Management System), and it is to be used by the cantonal authorities as well as the Swiss Federal Roads Authority for medium-term to long-term planning on the basis of data stored in KUBA-DB.*

*Maintenance encompasses both preservation of substance as well as expansion, i.e. modifications of, and additions to, the network.*



Verkehrsbehinderungen auf einer Baustelle verursachen Benutzerkosten. Traffic obstructions due to road works cause user costs.



Verteilung der jährlichen Kosten für den Unterhalt der Nationalstrassen 1997–1999.

*Average expenditures of the cantons and the confederation for the maintenance of the national motorway network from 1997 to 1999.*

Die Erhaltung umfasst den Unterhalt und den Ausbau, d.h. Anpassungen und Ergänzungen am Netz. Der Unterhalt wird in einem solchen System aufgrund des Zustandes und der Zustandsentwicklung geplant, der Ausbau wird als Ereignis mit berücksichtigt, d.h., er beeinflusst die Prioritätenlisten des Managementsystems.

Heute steht der Prototyp KUBA-MS-Ticino zur Verfügung. Im Vergleich zur ersten operationellen Version, KUBA-MS 1.0, welche für 2004/2005 vorgesehen ist, beschränkt sich der Prototyp KUBA-MS-Ticino auf Brücken, greift nicht direkt auf KUBA-DB-Daten und besitzt nicht alle vorgesehenen Funktionalitäten. Folgende Programmfunktionen sind enthalten:

- **Bauwerksinspektion:** Unterstützung der Aufnahme von Zustandsdaten.
- **Optimierung der Erhaltungsstrategie:** Bestimmung der wirtschaftlich optimalen Erhaltungsstrategie für einen bestimmten Bauwerksbestand. Als Basisstrategien befolgt er die optimale Strategie und die minimale Strategie (Aufrechterhaltung der Betriebsbereitschaft und der Sicherheit).
- **Finanzbedarf:** Er berechnet für die beiden Basisstrategien und für weitere Erhaltungsstrategien den Finanzbedarf pro Jahr über den untersuchten Betrachtungszeitraum.
- **Optimierung von Erhaltungsvarianten:** Für eine ausgewählte Gruppe von Kunstbauten kön-

nen verschiedene Varianten der in den nächsten zehn Jahren anstehenden Erhaltungsprojekte vom Benutzer definiert, untersucht und wirtschaftlich auf deren Auswirkungen auf die langfristige Kostenentwicklung optimiert werden.

- **Auswertungen:** Die in der Datenbank von KUBA-MS-Ticino gespeicherten Daten können nach verschiedenen Kriterien ausgewertet werden. Damit bieten sich viele Möglichkeiten von Analysen und Auswertungen.
- **Parameterstudien und Sensitivitätsanalysen:** Durch Variation der verschiedenen Parametersätze und ihrer Kombination können Parameterstudien und Sensitivitätsuntersuchungen durchgeführt werden, so z.B. für die Verfallsgesetze. Solche Analysen sind anspruchsvoll und nur erfahrenen Anwendern zu empfehlen.

### Netzweite Betrachtungen (Asset Management)

Die Betrachtung der Benutzerkosten führt zwangsweise zur Forderung nach integraler und zentraler Planung des Unterhalts, denn für einen Fahrzeuglenker spielt es keine Rolle, ob die Instandsetzung einer Brücke oder des Belages die Ursache für den Verkehrsstau bildet. Unter dem Namen UPLaNS läuft deshalb im ASTRA ein Projekt, mit dem der Unterhalt und die Umgestaltung des gesamten Netzes geplant werden soll. Dieses umfasst neben den Kunstbauten die Beläge, die bergmännischen Tunnels und elektromechanischen Anlagen.

Mit einem solchen Werkzeug lassen sich die Gesamtkosten der Erhaltung minimieren, insbesondere lassen sich die Verkehrsbehinderungen auf das für den Bau nötige Minimum reduzieren. Wegen der Komplexität der Verfahren werden leistungsfähige IT-Werkzeuge noch eine Weile nicht zur Verfügung stehen. Aus diesem Grunde geht das ASTRA pragmatisch vor und behilft sich mit einfachen Abläufen, die für die Strassenbenutzer Erleichterungen vorsehen.

*In a structures management system, the maintenance tasks are planned on the basis of the condition of each structure as well as the development of its condition, while expansions are included as significant events, i.e., they influence the management system's priorities list.*

*At present we are using a prototype of this system (KUBA-MS-Ticino). By comparison with the first operational version (KUBA-MS 1.0), which is expected to be ready for 2004/2005, this prototype focuses solely on bridges, does not directly access data from KUBA-DB, and does not perform all the functions that are foreseen for Version 1.0. It contains the following program functions:*

- **Inspection of structures:** supports the entry of data concerning the condition of each structure.
- **Optimisation of preservation strategy:** definition of economically optimal preservation strategy for a given quantity of structures. The basis here comprises an optimal and a minimal strategy (preservation of operational condition and safety).
- **Financial requirements:** calculation of the financial requirements per annum for these two strategies, as well as for any other necessary maintenance strategies, throughout the entire trial period.
- **Optimisation of preservation options:** we can define and examine options concerning maintenance projects that will be required for a selected group of structures over the next ten years, and can optimise them from the point of view of their economic impacts on the long-term costs trend.
- **Evaluation:** we can evaluate the data stored in the KUBA-MS-Ticino database on the basis of different criteria. This tool therefore provides us with numerous options with respect to analyses and evaluations.
- **Parameter studies and sensitivity analyses:** We are able to carry out parameter studies and sensitivity



Heute stützt man sich auf Instandsetzungsprojekte der Kantone, welche im ASTRA ohne EDV-Unterstützung zu Massnahmenpaketen eines definierten Unterhaltsabschnittes kombiniert werden. Die Benutzerkosten werden sicher reduziert, die Minimierung der Gesamtkosten kann aber nicht nachgewiesen werden.

## Schlussbemerkung

Die Entwicklung der Managementwerkzeuge im ASTRA haben zum Ziel, die Erhaltung des Strassennetzes im Allgemeinen und der Kunstbauten im Besonderen wirtschaftlich optimal zu planen. Mit dem breiten Einsatz von KUBA-DB als Datenbasis und der vorgesehenen Realisierung von KUBA-MS 1.0 wird in absehbarer Zukunft die Wirtschaftlichkeit der Erhaltung optimiert und die Zustandsentwicklung des Bestandes für verschiedene Szenarien dargelegt werden können. Mit der integralen und zentralen Planung des Strassenunterhalts werden in absehbarer Zukunft weitere Schritte in Richtung der wirtschaftlich optimalen Erhaltung des Nationalstrassennetzes getan.

analyses by modifying the various sets of parameters and their combinations – for example, for the laws of deterioration. However, analyses of this type are very complex and should therefore only be attempted by experienced users.

## Network-wide asset management

The consideration of user costs inevitably gives rise to the need for integral and central planning of maintenance tasks. After all, for road users it is of little consequence whether a traffic jam has been caused due to maintenance work on a bridge or repairs to the pavement. The Swiss Federal Roads Authority has therefore initiated a project called «UPLANS», in which the aim is to develop a method for planning maintenance tasks and modifications for the entire network. In addition to bridges and other structures, this is to include pavement, tunnels and electro-mechanical installations. With such an all-encompassing tool we would be able to minimise the overall maintenance costs, and in particular would also be able to reduce interference with traffic flow to the minimum level required for the tasks concerned.

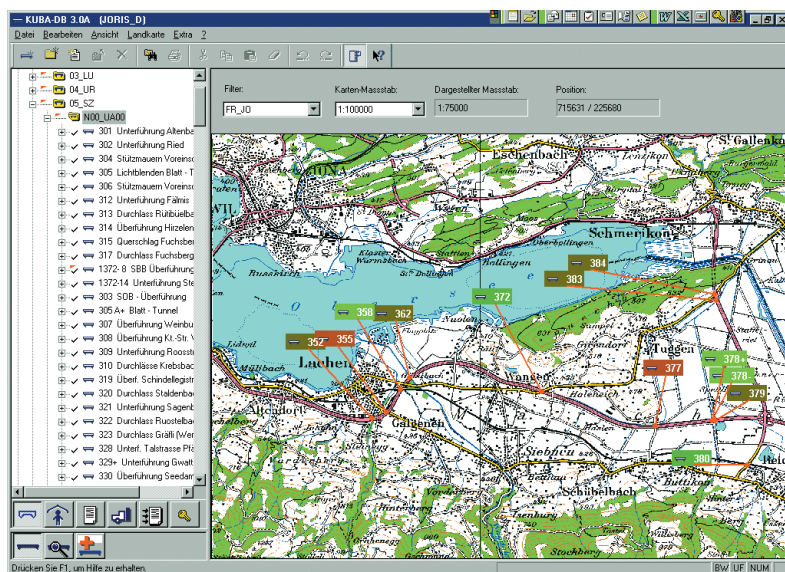
Due to the complexity of the various procedures, it will still be quite a while before we have sufficiently powerful IT tools at our disposal. The Swiss Federal Roads Authority has therefore adopted a pragmatic approach, and is starting out with simple procedures that are intended to bring about relief for road users. Today we rely on maintenance projects on the part of the cantonal authorities, which we combine internally (without using dataprocessing tools) into packages of measures for the maintenance of a defined section of motorway. In this way it is certainly possible to cut user costs, but it is not possible to achieve a minimisation of overall costs.

## Concluding remarks

The Swiss Federal Roads Authority's main aim behind its development of management tools is to plan the maintenance of the motorway network in general, and engineering structures in particular, in an economically optimised manner. With the widespread use of KUBA-DB as a database, and the subsequent development of KUBA-MS 1.0, we will be able to optimise the economic efficiency of maintenance operations in the foreseeable future, as well as depict the development of the condition of selected structures for various scenarios. And with the integral and central planning of road maintenance, we will also be able to take a further step in the direction of economically optimal maintenance of our motorway network.

### Verfasser / Author

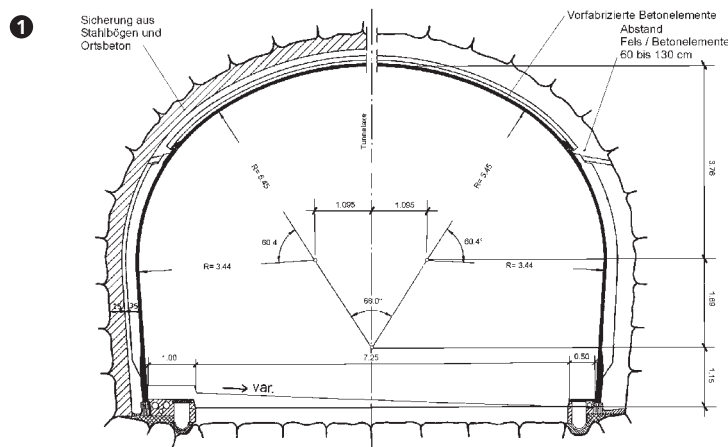
Jean-Pierre Joris  
dipl. Bauing. ETH  
Bundesamt für Strassen (ASTRA)  
CH-3003 Bern  
jeanpierre.joris@astra.admin.ch



KUBA-DB, Darstellung von Objekten der A3 und ihres Zustandes auf einer Landkarte.

KUBA-DB, Presentation of objects of the A3 and their condition on a map of the Federal Office of Topography.

Peter Kübler, Jodok Bregy



Ursprüngliches Normalprofil Fels.  
Bored tunnel standard section before rehabilitation.

### Übersicht

Der Naxbergtunnel liegt auf dem Autobahnabschnitt (A2) zwischen Wassen und Göschenen in unmittelbarer Nähe des Gotthard-Strassentunnels und wurde in den Siebzigerjahren erstellt. Von 1999 bis 2001 wurde dieser Autobahnabschnitt einer Generalrevision unterzogen, mit der Vorgabe eine Nutzungsdauer von 75 Jahren für die Tragstrukturen zu gewährleisten. Der Naxbergtunnel besteht aus der 520m langen, 3-spurigen Bergröhre (2 Fahrspuren, 1 Standspur) und der 2-spurigen Talröhre mit einer Länge von 455m. Der Tunnel liegt grösstenteils im massigen Granitfels.

### Tragstruktur Naxbergtunnel

Die Tragstruktur des Naxbergtunnels umfasst verschiedene Bauteile, welche in Bezug auf Tragsicherheit und Gebrauchstauglichkeit unterschiedliche Bedeutung aufweisen. Die Tunnelröhren wurden zu ca. 20% im Tagbau erstellt. Die Tagbaustrecken bestehen aus massiven, armierten Ortbetongewölben von 50 bis 80cm Stärke. In den Bergbaustrecken wird zwischen Aussen- und Innengewölbe unterschieden. Das Aussengewölbe ist die eigentliche Tragstruktur und

besteht abschnittsweise aus anstehendem Fels mit oder ohne Sicherung (Spritzbeton und Felsanker), aus Einbaubögen mit Betonverfüllung sowie aus Ortbetongewölben. Das Innengewölbe setzt sich zu 80% aus vorgefertigten Betonelementen und zu rund 20% aus armiertem Ortbeton zusammen. Die vorgefertigten Betonelemente (2 Wandplatten, 1 Deckenplatte) bilden einen 4-Gelenk-Bogen mit zwei seitlichen Abstützungen der oberen Gelenkpunkte zur Aufnahme der Horizontalkräfte der Deckenplatte (Bild 1).

### Ausgangslage vor Instandsetzung

Die Abgase der Fahrzeuge und die Einwirkungen des Streusalzes aus dem Verkehr der letzten 25 Jahre haben die Bauteile stark belastet und erforderten eine Instandsetzung. Beim Innengewölbe des Bergbaus wiesen die vorgefertigten Betonelemente mit einer Konstruktionsstärke von lediglich 50mm einen hohen Chloridgehalt auf, und die Armierung war im Begriff zu korrodieren oder war mindestens stark korrosionsgefährdet. Bei den Tagbaustrecken wies die Betonstruktur Mängel auf, und die Bewehrung war durch Chlorideintrag bis

### Projektdaten

#### Region

Zentralschweiz, Kanton Uri

#### Nutzung des Bauwerks

2-röhriger Autobahntunnel A2

#### Bauherr

Kanton Uri vertreten durch die Baudirektion, Amt für Tiefbau

#### Projektingenieur / Bauleitung

Ingenieurgesellschaft Basler & Hofmann, Bänziger + Köppel + Partner, Projekta AG

#### Bauausführung

Arbeitsgemeinschaft ZMB Zschokke Locher AG, Murer AG, Bau AG

#### Kenndaten

3-spurige Bergröhre: 520m  
2-spurige Talröhre: 455m  
Bergbau ca. 80%, Tagbau ca. 20%  
Instandsetzungskosten: ca. 16 Mio. CHF.  
Bauzeit Bergröhre: März bis Juni 2000  
Bauzeit Talröhre: März bis Juni 2001  
Wiedereröffnung: im Juli 2000 resp. Juli 2001

#### Herausragende Merkmale

Instandsetzungsarbeiten unter schwierigen Arbeitsverhältnissen bei minimal zugelassenen Verkehrsbehinderungen und engen Terminvorgaben

### Summary

The Naxberg tunnel is located along the motorway A2 in the heart of the Swiss Alps, very close to the Gotthard road tunnel, and was built in the 1970s. From 1999 to 2001, this section of the motorway was given a general overhaul, with the objective of guaranteeing a usable life of 75 years for the supporting structures. The Naxberg tunnel consists of a 520m long, three lane tunnel for the upward traffic (2 carriageways and one lane for the slow traffic) and a two-lane tunnel for the downward traffic, with a length of 455m. The tunnel lies mainly in solid granite.

### Naxberg tunnel structure

The Naxberg tunnel structure consists of a number of different construction elements, which are of varying importance with regards the load-bearing capacity and guarantee of usability. 20% of the tunnel length were built in open-cut excavations. The cut and

## Project data

### Region

Central Switzerland, canton of Uri

### Use of the structure

Twin-tube A2 motorway tunnel

### Owner

Canton of Uri represented by the building authority, Civil Engineering Department

### Project engineers/site management

Engineering Consortium  
Basler & Hofmann, Bänziger  
+ Köppel + Partner, Projekta AG

### Contractors

ZMB Consortium  
Zschokke Locher AG, Murer AG, Bau AG

### Technical data

3-lane tunnel, 520m (upward traffic)  
2-lane tunnel, 455m (downward traffic)  
Bored tunnel 80%, cut  
and cover tunnel 20%  
Rehabilitation costs ca. CHF 16 million  
Construction period 3 lane tunnel:  
March till June 2000  
Construction period 2 lane tunnel:  
March till June 2001  
Reopening: July 2000  
and July 2001 respectively

### Special characteristics

Rehabilitation work under difficult working conditions, minimally permitted traffic obstruction and strict deadlines

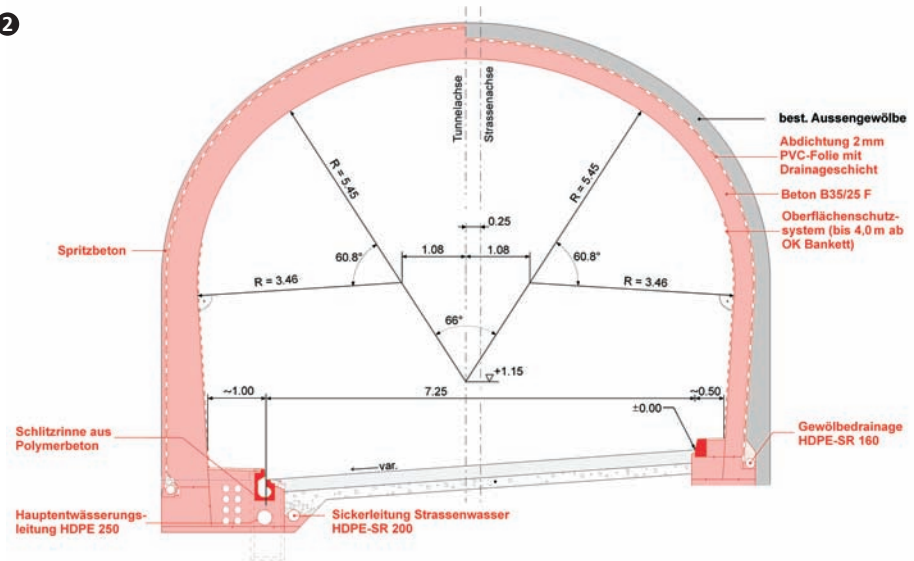
in eine Höhe von 3m über der Fahrbahnoberkante am Korrodieren. Es waren Schäden in Form von Rissen und Abplatzungen festzustellen.

Alles im Tunnel anfallende Wasser wurde bisher im Mischsystem entwässert. So floss das Bergwasser aus dem Hohlraum hinter den vorfabrizierten Betonelementen in die Rigole der Strassenentwässerung und beim Nordportal zusammen mit dem Strassenwasser direkt in den Vorfluter.

## Instandsetzungskonzept

Die vorfabrizierten Betonelemente des Innengewölbes werden vollumfänglich entfernt und durch eine Abdichtung und ein unarmiertes Innengewölbe aus Ortbeton ersetzt (Bild 2). Das neue Innengewölbe weist aufgrund der bestehenden, sehr stark variierenden Ausbruchgeometrie eine Stärke zwischen 25 und 130cm auf. Auf rohe Felsbereiche wird vor dem Anbringen der Drainagematte und der Abdichtung rund 7 bis 30cm Spritz-

2



Normalprofil Fels nach Instandsetzung.  
Bored tunnel standard section after rehabilitation.

cover sections consist of solid, reinforced cast-in-place concrete vaults 50 to 80cm thick. In the tunnelled sections, a distinction is made between the outer and the inner final lining. The outer lining is the actual bearing structure, and consists in sections of bedrock only with or without lining (sprayed concrete and rockbolts), of steel girders with concrete filling, and cast-in-place linings. The inner final lining consists of up to 80% prefabricated concrete elements and up to approximately 20% reinforced cast-in-place concrete. The prefabricated concrete elements (2 wall and 1 ceiling

panels) make up a four-section arch with two side supports for the upper joints, to take the horizontal loading of the ceiling panels (figure 1).

## Condition prior to rehabilitation work

The exhausts of vehicles and the effects of de-icing salt from traffic over the past 25 years have had a strongly negative effect on the structural elements, resulting in the need for rehabilitation work. In the case of the inner tunnel lining, the prefabricated concrete elements with a structural thickness of just 50mm show a high chlo-

3



Abbruch der vorfabrizierten Betonelemente.  
Demolition of prefabricated concrete elements.





4  
Innengewölbeschalung.  
Formwork for the inner lining.

beton als Abdichtungsträger aufgetragen. In den Tagbaustrecken werden die äusseren 7cm Beton bis in eine Höhe von 3m über Fahrbahnoberkante mit Hochdruck-Wasser (HDW) abgetragen, und die Bewehrung bis zu einem Reinheitsgrad von Sa 2 entrostet. Der abgetragene Bereich wird mittels Vorbeton mit einer Stärke von 12cm reprofiliert. Ein Oberflächenanstrich bis 4m über der Fahrbahn schützt das neue Innengewölbe resp. den reprofilierten Beton vor erneutem Chlorideintrag. Die heutige Entwässerung wird durch ein Trennsystem er-

setzt. Das anfallende Bergwasser (Sauberwasser) fliesst hinter der Abdichtungsfolie in einer Drainagematte zur Gewölbedrainageleitung und dann direkt in den Vorfluter. Das Strassenwasser (Schmutzwasser) wird über eine Schlitzrinne gefasst, aus Gründen des Brandschutzes alle 50m siphoniert, in Aufbereitungsanlagen gesäubert und erst dann in den Vorfluter abgegeben. Die heute bestehenden Kabelkanäle werden durch Kabelblöcke in Ortbeton ersetzt.

### Bauausführung

Die Instandsetzungsarbeiten der Berggröhre erfolgten von Anfang März bis Ende Juni 2000, die der Talröhre von Anfang März 2001 bis Ende Juni 2001. Während der Sperrung der jeweiligen Tunnelröhre wurde der Verkehr im Gegenverkehr in die Nachbarröhre umgeleitet. Für die Erschliessung der Nachbarbaustellen musste immer eine Werkspur durch die Baustelle geführt werden, was den Arbeitsraum im Tunnel sehr stark einschränkte. In einem ersten Schritt wurden im Bereich des Bergbaus die Betonelemente während der Nacht mit schwerem Gerät abgerissen (Bild 3). Anschliessend erfolgte der Abbruch der seitlichen Bankette sowie der Auftrag des Spritzbetons als Trägerschicht für die Regen-

ride content, and the reinforcement is already corroding or greatly jeopardised by corrosion. In the cut and cover sections, the concrete structure is in need of repair, and the reinforcement was undergoing corrosion from chloride up to a height of 3m above the carriageway surface, resulting in damages in the form of cracking and chipping of the concrete. All of the water entering the tunnel has been drained so far via a mixing system. The underground water flowed from the hollow chamber behind the prefabricated concrete elements into the road drainage, and from there directly together with the road runoff water into the river at the north portal.

### Rehabilitation work plan

The prefabricated concrete elements of the inner lining were removed in their entirety, and replaced by a seal and an unreinforced new inner lining of cast-in-place concrete (figure 2). The new inner lining, due to the greatly varying former excavation geometry, showed a thickness of between 25 and 130 cm. Prior to the emplacement of drainage meshes and sealing, around 7 to 30 cm of sprayed concrete was applied as seal support to the exposed bedrock sections. In the cut and cover sections, the external 7cm concrete was removed by high-pressure water to a height of 3m over the carriageway upper surface, and the reinforcement derusted to a purity of Sa 2. The so treated sections were reprofiled by 12 cm thick concrete. A surface protective layer up to 4 m above the carriageway surface will protect the new inner lining and the reprofiled concrete from new chloride attack. The old drainage system has been replaced by a separating system. The arising underground water (clean water) flows behind the seal layer into a drainage mesh to the arch drainage system, and then directly into the river. The road runoff water (contaminated water) is collected via a slotted gutter, which



5  
HDW-Roboter.  
High-pressure water robot.



schirmabdichtung. Nach dem Betonieren der Gewölbewiderlager sowie dem Aufbringen der Drainagematte und der Abdichtungsfolie wurde das Innengewölbe im Pilgerschritt-Verfahren erstellt (Bild 4). Dazu kamen zwei selbstfahrende Schalungswagen zu je 120t zum Einsatz. In den Tagbaustrecken wurde nach dem Abbruch der Bankette der chloridbelastete Beton mit HDW-Robotern abgetragen und reprofiliert (Bild 5). Das Erstellen der Bankette mit den entsprechenden Werkleitungen, der Auftrag des Oberflächenschutzes sowie der Ersatz der Verschleisschicht der Fahrbahn schlossen die Instandsetzungsarbeiten ab (Bild 6).

## Erfahrungen

Die sehr knappe Bauzeit von je 3 Monaten pro Tunnelröhre und die engen Platzverhältnisse im Tunnel erforderten eine intensive Zusammenarbeit zwischen Bauherr, Planer und Unternehmer sowie eine minutiöse Planung der einzelnen Arbeitsschritte. Sämtliche Arbeitsschritte für die Instandsetzung fanden teilweise innerhalb eines Arbeitsbereiches von 100m statt. Diese umfangreichen Arbeiten konnten nur durch einen 3-Schicht-Betrieb während 6 Tagen in der Woche termingerecht bewältigt werden. Kritisch in Bezug auf das Bauprogramm war insbesondere die Erstellung des Innengewölbes innerhalb von jeweils acht Wochen, wobei aufgrund der Ausbruchgeometrie bis zu 220m<sup>3</sup> Beton pro 10-m-Etappe eingebracht werden musste. Die Instandsetzung des Autobahnabschnittes Wassen-Göschenen unter minimal zugelassenen Verkehrsbehinderungen und unter den besonderen Umgebungsbedingungen einer Bergregion stellte hohe Anforderungen an die Qualität der Arbeiten und an die Einhaltung von Terminen und Kosten. ●

*for fire protection reasons is siphoned every 50 m, and cleaned in treatment plants before being released into the river. The previous cable ducts were replaced by cast-in-place cable ducts.*

## Construction work

*The rehabilitation work on the three line tunnel was carried out from the beginning of March till the end of June 2000, those of the two line tunnel from the beginning of March till the end of June 2001. During the closure of each of the tunnel tubes, the traffic was diverted through the neighbouring tube. The work being carried out in the adjoining construction site required a working lane through the site to be maintained throughout the work period, which greatly limited the available working space in the tunnel. The first stage involved removing the concrete elements in the three-lane tunnel during the night by heavy equipment (figure 3). Then the demolition of the shoulder (footpath) and the application of the sprayed concrete as support for umbrella seal was carried out. After the concreting of the arch abutment and the emplacement of the drainage mesh and the sealing layers, the inner lining (cast-in-place concrete) was rebuilt in step-by-step procedure (figure 4). Two self-powered formwork vehicles, each 120t, were used. In the cut and cover sections, after the demolition of the shoulder (footpath), the chloride-damaged concrete was removed by high-pressure water robots and reprofiled (figure 5). The reconstruction of the shoulder with the respective utility lines, the application of the surface protection, and the replacement of the sealing layer of the carriageway concluded the rehabilitation work (figure 6).*

## Conclusion

*The very limited construction time of just 3 months for each of the tunnel tubes, and the tight space in the tunnel, demanded a well-coordinated cooperation be-*



Abschlussarbeiten im Tagbaubereich.  
Finalisation work in cut and cover section.

*tween the owner, engineers site supervision and contractors, not to mention very detailed planning of each of the work steps. All of the work steps for the corrective rehabilitation were conducted within a working area no more than 100m long. These comprehensive tasks could only be successfully concluded within the schedule by use of a 3-shift operation over a 6-day working week. Of particular importance for the construction schedule was the construction of the inner lining within eight weeks in each case regarding the former excavation geometry up to 220 m<sup>3</sup> concrete were required per 10m section. The rehabilitation work of this motorway section under conditions of minimal traffic interruption, and under the special conditions of a mountainous region, placed high demands on the quality of the work and the maintenance of schedules and budgets.* ●

### Verfasser / Authors

Peter Kübler  
dipl. Bauing. ETH, Basler & Hofmann AG  
Forchstrasse 395, CH-8029 Zürich  
pkuebler@bhz.ch

Jodok Bregy  
dipl. Bauing. ETH, Basler & Hofmann AG  
Forchstrasse 395, CH-8029 Zürich  
jbregy@bhz.ch

Martin Diggelmann



Garstattbrücke mit zwei einzelnen, in Längsrichtung versetzten dreigelenkigen Kastenbögen.  
*Garstatt bridge with two single three-jointed box-arches staggered in the longitudinal.*

### Einführung

Die Brücken von Robert Maillart sind weltbekannt; die Salginatobelbrücke im Kanton Graubünden ist wohl die berühmteste (siehe Artikel von H. Figi). Weitere zehn zum Teil bedeutende Brücken Maillarts befinden sich in abgelegenen Regionen des Kantons Bern [7]. Sie wurden in den Jahren 1930 bis 1940 in Stahlbeton erstellt; die meisten davon befinden sich im Originalzustand. Die Bauwerke müssen jedoch an neue Nutzungsanforderungen angepasst werden. In diesem Aufsatz werden grundsätzliche Überlegungen zur Erhaltung der interessantesten Brücken erläutert (Tabelle 1).

### Beschreibung der Brücken

Maillarts Brücken sind durch die absolute Ökonomie der Mittel gekennzeichnet. Durch zweckmässige Konstruktionen sind alle Elemente einer Brücke optimal ausgenutzt. Die Abmessungen der einzelnen Stahlbetonteile sind minimiert, alles Überflüssige ist weggelassen [1].

Beispielsweise löste Maillart die ursprünglich massiven Bogenbrücken in einzelne Scheiben auf, welche zusammen als räumliches Tragwerk wirken. Zur Vermeidung

von Zwängungen benutzte er ausschliesslich statisch bestimmte Dreigelenkbögen. Dieses Konzept war den damaligen Möglichkeiten der Eisenbetonbauweise angepasst und ermöglichte den Bau von leichten, eleganten Brücken. Vertreter der steifen Bögen sind die Rossgraben-, die Garstatt- sowie die Salginatobelbrücke. Eine Besonderheit stellt die zweispurige, schiefwinklige Garstattbrücke dar, welche aus zwei einzelnen, in Längsrichtung versetzten dreigelenkigen Kastenbögen besteht (Bild 1).

Eine wegweisende Weiterentwicklung führte zu den versteiften Stabbögen ohne Gelenke. Die Lehrgerüstkosten konnten erheblich gesenkt werden, da zunächst nur das Gewicht der dünnen Gewölbeplatte zu tragen war. Die aufgeständerte Fahrbahnplatte mit den Brüstungen bildete den Versteifungsträger. Dieses System war auch für gekrümmte Brücken anwendbar. Vertreter der versteiften Stabbögen sind die Spital-, die Traubach- und die Schwandbachbrücke (Bild 2) [2], [3].

### Erhaltungswert der Bauwerke

Im schweizerischen Mittelland wurden viele Brücken Maillarts wegen ungenügender Breite und zu geringer Tragfähigkeit inzwischen ersetzt oder komplett umgebaut. Hingegen blieben die Brücken in den abgelegenen Regionen wegen den bisher bescheidenen Nutzungsanforderungen grösstenteils im Originalzustand erhalten. Als Zeugen einer technischen Entwicklung steigt dadurch deren historisch-kultureller Erhaltungswert. Die originale Bausubstanz sollte konserviert und nicht ersetzt werden [4].

### Überprüfung und Erhaltungskonzepte

Die einzelnen Bauwerke sind in einem erfreulich guten Zustand.

### Projektdaten

siehe Tabelle 1

### Projektverfasser

Robert Maillart, Bern (1872–1940)

### Bauherren

Tiefbauamt des Kantons Bern, Oberingenieurkreis I  
Gemeinden Habkern, Wahlern, Rüeggisberg

### Projektingenieure für Erhaltung

Diggelmann + Partner AG, Bern  
www.dig-ing.ch  
Moor Hauser + Partner AG, Bern  
www.moorhauser.ch

### Beratung

Prof. Dr. E. Brühwiler, ETH Lausanne

### Planung und Durchführung der Erhaltungsmassnahmen

1994 / 2000–2005

### Besondere Merkmale

Elegante, filigrane Bauwerke, damals wirtschaftlich erstellt durch ökonomischen Einsatz der Mittel, wegen Alterung und Überbeanspruchung mittelfristig gefährdet, als Zeitzeugen unbedingt erhaltenswert

### Introduction

*The bridges of Robert Maillart are known throughout the world; the Salginatobel bridge in the canton of Grisons is probably the most famous (see article by H. Figi). A further ten bridges, some of them significant, are to be found in remote regions of the canton of Berne [7]. They were built in the years between 1930 and 1940 with reinforced concrete, and the majority of them are still in their original state. However, the bridges will have to be adapted for the requirements of future utilisation. In this article basic considerations are made concerning the preservation of the most interesting bridges (table 1).*

### Description of the bridges

*Maillart's bridges are characterised by an absolute economy of resources. By choosing efficient structural systems, all elements of a bridge are optimally used. The dimensions of the individual reinforced concrete parts are min-*

## Project data

see table 1

### Project author

Robert Maillart, Bern (1872–1940)

### Owners

Civil engineering inspectorate of the canton of Bern, District I  
Communities of Habkern, Wahlern, Rüeggisberg

### Project engineers for the conservation

Diggelmann + Partner AG, Bern  
www.dig-ing.ch  
Moor Hauser + Partner AG, Bern  
www.moorhauser.ch

### Expert

Prof. Dr. E. Brühwiler, Swiss Federal Institute of Technology Lausanne (EPFL)

### Planning and execution of the conservation measures

1994 / 2000–2005

### Special characteristics

Elegant, filigree structures, at that time economically built by efficient deployment of means, because of ageing and overloading endangered medium-term, absolutely worthy of preservation as contemporary witnesses

Korrosionsschäden an Bewehrungsstäben sind nur dort entstanden, wo Feuchtigkeit im porösen Stampfbeton nicht austrocknen konnte. Schwerwiegender sind Korrosionsschäden, wo Tausalze wegen fehlender Abdichtung und undichter Fahrbahnübergänge in die Betonkonstruktion eindringen konnten. Maillart hat seine Brücken für Nebenstrassen gemäss den damals gültigen Normen dimensioniert.

imised, and anything unnecessary is omitted [1].

For example, Maillart broke down the original massive arch bridges into individual plates, which function together as spatial structures. In order to avoid imposed deformations, he used exclusively statically determined three-hinged arches. This concept was adapted to the limitations of reinforced concrete of that time and enabled the building of light and elegant bridges. Examples of rigid arches are the Rossgraben bridge and the Salginatobel bridge. The two-lane, skew Garstatt bridge is special as it consists of two box-arches being longitudinally staggered (figure 1).

A ground-breaking development lead to the deck-stiffened arches without joints. The falsework costs could be considerably reduced, since initially only the weight of the thin arch plate had to be supported. The elevated carriageway slab with the parapets constitutes the stiffening support. This system was also applicable to curved bridges. Examples of the deck-stiffened arches are the Spital bridge, the Traubach bridge and the Schwandbach bridge (figure 2) [2], [3].

## Conservation value of the bridges

In the Swiss plateau Maillart's bridges have often been replaced or completely rebuilt due to insufficient width of the carriageway and too low load-bearing capac-

ity. On the other hand the bridges in the remote regions have been mainly preserved in their original state, due to their modest utilisation requirements up to now. As a witness of technical progress, their historical-cultural conservation value thereby increases. This heritage should be preserved and not replaced [4].

## Examination and preservation concepts

The individual structures are in satisfactorily good condition. Corrosion damage on the reinforcement bars has only occurred when humidity in the porous tamped concrete could not dry out. More serious is the corrosion damage due to deicing salt penetrating into the reinforced concrete because of a lack of sealing or leaky expansion joints in the carriageway.

Maillart designed his bridges for secondary roads according to the then valid standards. In a homogeneous state the arches hardly experienced any tensile stresses, so that the reinforcement remained unconsidered. Recent structural analysis has shown that the load-bearing resistance of the arches determined in the cracked state is substantially higher than originally calculated. This was already suspected in 1940 when load tests were made, it could however not be verified. The load-bearing reserves in the case of the Garstatt bridge enable the permissible vehicle weight to be increased from 14 to 32 metric

## Tabelle 1/Table 1

Im Aufsatz beschriebene Maillart-Brücken.  
Maillart bridges described in the article.

Type	Name of bridge	Place	Year	Span	Width	Permitted loading
		(all in the canton of Berne)		[m]	[m]	original/actual/after strengthening [t]
Deck-stiffened arch	Spital	Adelboden	1930/31	30.00	5.80	14 / – / 40
	Traubach	Habkern near Interlaken	1932	40.00	4.00	7 / 12 / 28
	Schwandbach	Hinterfultigen near Schwarzenburg	1933	37.40	4.45	7 / 12 / –
Three-hinged arch	Rossgaben	Schwarzenburg	1932	82.00	3.60	7 / 12 / –
	Aarebrücke	Innertkirchen	1934	30.00	7.60	14 / 32 / 40
	Garstatt bridge over river Simme	Garstatt, Simmental	1939/40	32.00	6.50	14 / 32 / 40





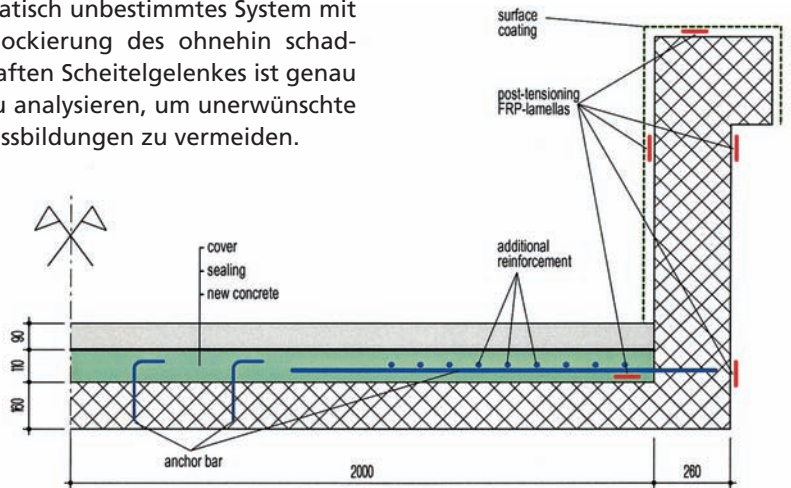
Schwandbachbrücke, versteifter Stabbogen mit gekrümmter Linienführung.  
*Schwandbach bridge, horizontally curved deck-stiffened arch.*

Im homogenen Zustand erhielten die Bögen unter damaligen Verkehrslasten kaum Zugspannungen, sodass die Bewehrung unberücksichtigt blieb. Kürzlich durchgeführte Tragwerksanalysen zeigen, dass die im gerissenen Zustand ermittelten Tragwiderstände der Bögen wesentlich höher liegen als ursprünglich berechnet. Dies wurde bereits aufgrund der Belastungsversuche von 1940 vermutet, konnte aber nicht verifiziert werden. Die Traglastreserven erlauben im Falle der Garstattbrücke, die zulässigen Fahrzeuggewichte von ursprünglich 14 auf 32 Tonnen anzuheben [5]. Dabei ist jedoch mit einer Zunahme der Rissbildung zu rechnen, was sich ungünstig auf die Dauerhaftigkeit auswirkt. Die Erhaltungskonzepte basieren für alle Brücken auf der gleichen Strategie. Der ursprüngliche Charakter und das Erscheinungsbild der Bauwerke sind unbedingt zu erhalten. Prägnante Stilmerkmale wie zum Beispiel filigrane Geländer dürfen nicht verloren gehen. Die intakten Bauteile und Oberflächen sind mit hydrophobierenden Lasuren oder Inhibitoren sanft und sorgfältig zu schützen. Beschichtungen sind nur bei besonders exponierten Bauteilen vorzusehen, z.B. bei direkter Belastung durch Tausalze. Beschädigte Elemente werden nach Möglichkeit mit adäquaten Baustoffen instand gesetzt und nur

notfalls ersetzt. Der Entwässerung ist in jedem Fall grösste Bedeutung beizumessen [6].

### Massnahmen zur Erhöhung der Tragfähigkeit

Mit der Anhebung der zulässigen Lastwagengewichte in der Schweiz von 28 auf 40 Tonnen im Jahr 2000 sind die Traglastreserven der unverstärkten Maillart Brücken endgültig erschöpft (Bild 3). Mit Ausnahme der Schwandbach- und der Rossgrabenbrücke, welche auch zukünftig höchstens durch 12 Tonnen belastet werden, müssen die erhaltenswerten Brücken verstärkt werden, sofern sie nicht umfahren werden können. Versteifte Stabbögen lassen sich generell einfacher verstärken als Kastenbögen, da sich die wesentlichen Massnahmen auf den Versteifungsträger beschränken. Die Erhöhung der Tragfähigkeit kann durch Aufbetonieren der ohnehin instandsetzungsbedürftigen Fahrbahnplatte und durch die Verstärkung der Brüstungen erreicht werden (Traubachbrücke, Bild 4). Die Verstärkung von Kastenbögen hingegen ist statisch komplex und baulich aufwändig. Bei diesen Konstruktionen rächt sich das geniale Konzept Maillarts, da alle Teile des in Scheiben aufgelösten Bauwerks betroffen sind (Garstattbrücke). Der Umbau in ein statisch unbestimmtes System mit Blockierung des ohnehin schadhafte Scheitelgelenkes ist genau zu analysieren, um unerwünschte Rissbildungen zu vermeiden.

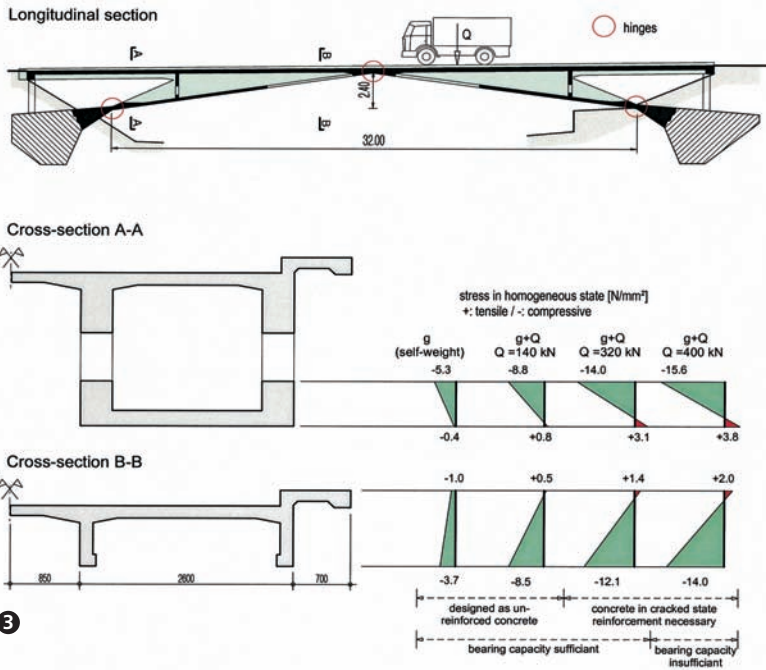


Traubachbrücke, vorgesehene Verstärkungskonzept.  
*Traubachbrücke, proposed strengthening concept.*

tons [5]. On the other hand an increase in crack formation must be taken into account, which is unfavourable for the durability. The conservation concepts for all the bridges are based on the same strategy. The original character and the appearance of the bridges are to be kept at all costs. Noteworthy characteristics such as the filigree railings for example must be maintained. The intact components and the surfaces are to be gently and carefully treated and protected with hydrophobic glazing or corrosion inhibitors. Surface coatings are only to be used in the case of especially exposed components, e.g. direct and splash exposure to deicing salts. Damaged elements when possible are to be restored with appropriate building materials and only to be replaced if absolutely necessary. Maximum consideration must be paid to the question of water drainage [6].

### Measures to increase the load-bearing capacity

The load-bearing reserves of the unstrengthened Maillart bridges are definitely exhausted with the raising of the permissible weight of heavy-goods vehicles in Switzerland from 28 to 40 t in the year 2000 (figure 3). With the exception of the Schwandbach and Rossgraben bridges, which even in the future will only be loaded



Garstattbrücke, Spannungsverteilung in 2 Querschnitten.  
Garstatt bridge, stress distribution in 2 cross-sections.

Für die Verstärkungsmassnahmen gelten die gleichen Anforderungen wie für die Erhaltungskonzepte. Die Proportionen des Bauwerks dürfen nicht wesentlich verändert werden. Verstärkungselemente in Form von Vorbetonierungen, Stahl- beziehungsweise CFK-Lamellen, Schubstangen oder externen Vorspannungen sind mögliche Lösungen. Diese Elemente sind sorgfältig zu gestalten und dürfen sich optisch unter Umständen von der ursprünglichen Konstruktion abheben.

## Ausblick

Durch eine enge Zusammenarbeit mit den einzelnen Bauwerkseigentümern, der Denkmalpflege sowie den subventionierenden Stellen wird angestrebt, in den kommenden Jahren insbesondere diejenigen Maillart-Brücken zu erhalten, die besonders wertvoll sind und mit moderaten Eingriffen für die Zukunft ertüchtigt werden können. Weniger wertvolle Bauwerke oder solche, welche nur mit einem grossen Eingriff für künftige Nutzungsanforderungen hergerichtet werden können, werden im Sinne einer Maillart'schen Ökonomie durch ein qualitativ hoch stehendes, zeitgerechtes Bauwerk ersetzt.

at most with vehicles up to 12 t, all the bridges worthy of preservation must be reinforced unless they can be detoured.

Deck-stiffened arches can be generally more easily strengthened than box arches, since the necessary measures are confined to the stiffening beams. Increasing the load-bearing capacity can be achieved by a concrete overlay of the deck slab, which in any case requires repair, and through the strengthening of the parapets (Traubach bridge, figure 4). Strengthening of box arches on the other hand is statically complex and constructionally costly. Here the ingenious concept of

**Verfasser / Author**  
Martin Diggelmann  
dipl. Bauing. ETH  
Diggelmann + Partner AG  
Kollerweg 9  
CH-3006 Bern  
m.diggelmann@dig-ing.ch

## Referenzen / References

- [1] Bill Max, Robert Maillart; Verlag für Architektur AG, Erlenbach ZH, 1949
- [2] D.P. Billington; Robert Maillart and the Art of Reinforced Concrete, Artemis, Zürich 1990
- [3] Robert Maillart; Betonvirtuose, Gesellschaft für Ingenieurbaukunst, Band 1, Zürich 1996
- [4] SIA Merkblatt 2017 «Erhaltungswert von Bauwerken», Ausgabe 2000
- [5] M. Ros: Belastungsversuche an der Strassenbrücke über die Simme bei Garstatt, Zürich 1943
- [6] «Erhaltungswürdigkeit von Kunstbauten», Bundesamt für Strassen, Bern, 1998
- [7] Inventar der noch erhaltenen Brücken von Robert Maillart, kant. Denkmalpflege, Bern 1991

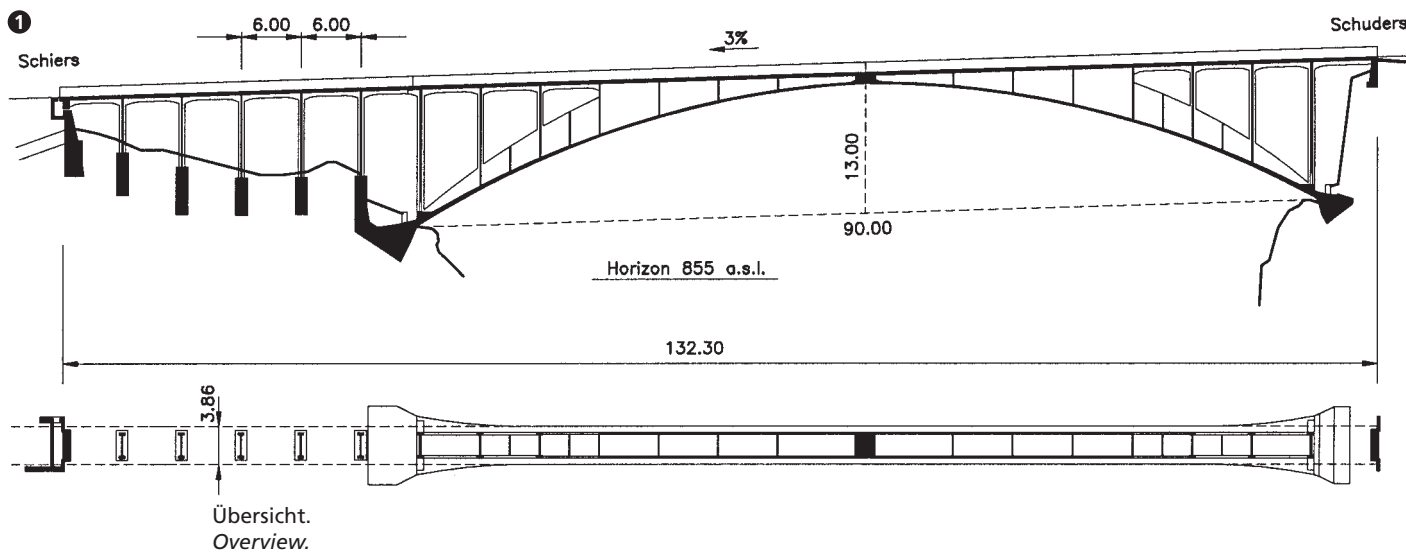
Maillart is at a disadvantage, since all components of the structure, broken down into plates, are affected (Garstatt bridge). The reconstruction into a statically indeterminate system and blocking the already damaged crown hinge has to be very carefully analysed in order to avoid unwanted crack formation.

The same requirements are valid for the strengthening measures as for the preservation concepts. The proportions of the structure may not be essentially changed. Strengthening elements in the form of additional layer of concrete, steel or fiber (FRP) strips, shear bars or external post-tensioning are possible solutions. These elements are to be carefully designed and may in the circumstances stand out optically from the original construction.

## Outlook

By working in close co-operation with the individual bridge owners, the Public Office for Monument Preservation and the subsidising authorities are striving in the coming years to preserve those Maillart bridges which are particularly valuable and with moderate engagement can be rehabilitated for future use. Less valuable bridges, or those that can only be rehabilitated at great expense for future requirements, will be replaced in the sense of Maillart-type economy with a high-quality, modern structure.

Heinrich Figi



### Einleitung

Die Salginatobelbrücke ist die bekannteste Brücke von Robert Maillart (1872–1940). Sie wurde 1991 durch die American Society of Civil Engineers (ASCE) zum internationalen Denkmal der Ingenieurbaukunst erklärt und zählt heute zu den Baudenkmalern von grosser Bedeutung.

Die Brücke wurde in den Jahren 1929/30 gebaut. Sie ist in Bild 1 schematisch dargestellt. Sie ist 133 m lang, die Fahrbahnbreite beträgt 3,50 m und das rund 90 m tiefe Tobel wird mit einem über 90 m gespannten Dreigelenkbogen überbrückt. Die beiden Bogenhälften sind mit seitlichen, nahezu dreiecksförmigen Scheiben versteift. Diese bilden im Scheitelbereich mit dem Bogen und dem Fahrtrahner über 53,60 m einen Kastenquerschnitt (Bild 2). In den übrigen Bereichen ist der Brückenüberbau als Durchlaufträger mit Regelspannweiten von 6,00 m und einer Dilatationsfuge bei der rechtsufrigen Kämpferstütze ausgebildet. Die seitlichen Brüstungen sind ab Oberkante Fahrbahnplatte 1,10 m hoch und nur 10 bis 15 cm dick (Bild 3). Sie werden für die Versteifung der Gesamtstruktur nicht mit einbezogen; sie dienen lediglich als Absturzschutz. Die Pfeiler sind als dünne Betonscheiben mit

Randverstärkungen ausgebildet. Die Bogenkämpfer und das obere Widerlager sind im Fels eingebunden; die Pfeiler der Vorlandbrücke und das Widerlager Seite Schiers sind mit Schächten fundiert.

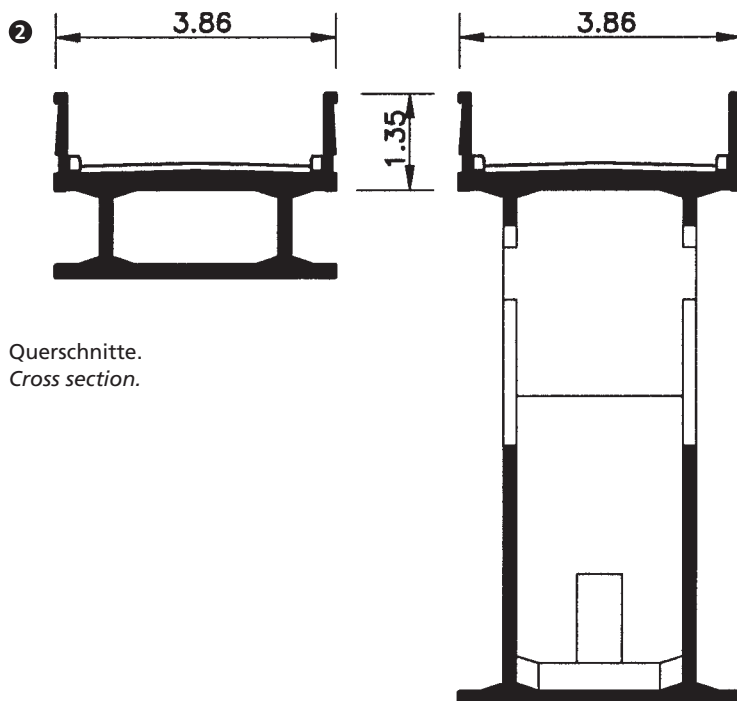
### Die Brückenkonstruktion: konzeptionell hervorragend, aber nicht ohne Schwachstellen

Die Salginatobelbrücke ist in konzeptioneller Hinsicht eine hervorragende Leistung. Bezüg-

### Introduction

The Salginatobel bridge is Robert Maillart's (1872–1940) most famous bridge. In 1991 it was declared an International Historic Engineering Landmark by the American Society of Civil Engineers (ASCE) and is recognised today as a structural monument of great importance.

The bridge was built in 1929/30 and is shown schematically in figure 1. It is 133 m long, the roadway is 3.50 m wide and the gorge 90 m below is spanned by



Querschnitte.  
Cross section.



lich Materialtechnologie und konstruktiver Ausbildung hingegen weist das Bauwerk verschiedene Schwachstellen auf.

Der Beton musste den Erfordernissen der Verarbeitung angepasst werden; bei dünnen oder dicht bewehrten Querschnitten wurde viel Wasser beigegeben, und die Verdichtung erfolgte mit Stampfern. Aus damaliger Sicht mag es Qualitätsbeton gewesen sein, den heutigen Anforderungen hinsichtlich Dauerhaftigkeit würde er aber nicht genügen.

Die konstruktive Ausbildung entspricht den Kenntnissen der damals noch jungen Eisenbetonbauweise. Die Fugen und Gelenke wurden zur Vermeidung von unerwünschten Zwängungen als notwendig erachtet, der Einfluss des Wassers wurde stark unterschätzt, und die Tendenz, jegliches unnötige Material einzusparen, führte zu äusserst knappen Bauteilabmessungen und geringen Bewehrungsüberdeckungen.

### Sieben Jahrzehnte problemloser Einsatz

Die Brücke wurde während fast 70 Jahren als normales Bauwerk einer Verbindungsstrasse mit bescheidenem Ausbaustandard genutzt. Sie vermochte die Anforderungen, welche an die anderen

a three-hinged arch of over 90 m. Both halves of the arch are stiffened with lateral, almost triangular walls. These form a box section (figure 2) in the crown area with the arch and the bridge deck. In the remaining areas the bridge superstructure is constructed as a continuous beam with spans of 6.00 m and an expansion joint in the right-bank abutment column. The side safety barriers are 1.10 m high and only 10 to 15 cm thick (figure 3). They are not structural elements; they serve only to prevent users of the bridge from falling into the gorge. The columns consist of thin concrete walls with thickened edges. The arch springings and the upper abutment are founded on solid rock; the approach pillars of the foreland bridge and the abutment on the Schiers side have shaft foundations.

### The bridge construction: conceptually excellent, but not without weak points

The Salginatobel bridge is a brilliant achievement in a conceptual respect. On the other hand, the structure has various weak points with respect to the material technology and the detailing.

The concrete had to be adapted to the placing requirements; for thin and heavily reinforced cross sections a lot of water was added, and compaction was achieved using tampers. In those days that was considered to be good-quality concrete, but it would not satisfy today's requirements with respect to durability.

The detailing reflects the limited knowledge of the then still recent reinforced-concrete construction technology. The joints and hinges were considered necessary to avoid undesired internal forces; the damaging effect of water was considerably underestimated, and the tendency to save costs on any unnecessary material lead to very skimpy element dimensions and thin reinforcement covering.

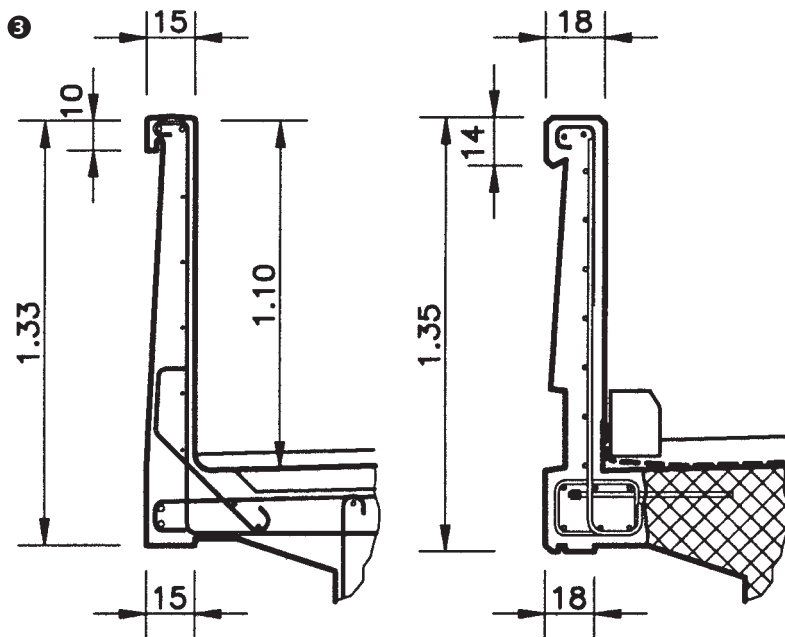
### Seven decades of trouble-free operation

The bridge was used for almost 70 years as a normal structure of a connecting road with a modest standard. It more than fulfilled the requirements set for the other sections of the road. Fortunately, deicing salt was never used on the bridge. In the years 1975/76 the first repair work was carried out. The objective of those measures was to eliminate the defective detailing in order to preserve the load-bearing structure. Scarcely any consideration was given to monumental conservation aspects.

### Its status as an international structural monument demands extensive conservation work

After the bridge was declared an international civil engineering monument, it became necessary to make conservation a long-term goal. With this objective in mind, the next maintenance work was planned. The following basic principles were set down together with the conservation authorities:

- The bridge is of great value. Even if the bridge were no longer used, the conservation maintenance would have to be continued.



Brüstungen: ursprüngliche Form (links), nach Ersatz (rechts).  
Safety barriers: original form (left), after repair work (right).



Eingehauste Brücke für die Spritzbetonarbeiten – wie ein Kunstwerk von Christo.  
*Enclosed bridge for the shotcrete work – like one of Christo's works of art.*

Abschnitte der Strasse gestellt wurden, problemlos zu erfüllen. Tausatz kam glücklicherweise nie zum Einsatz. In den Jahren 1975/76 wurden erste bauliche Erhaltungsmaßnahmen ausgeführt. Das Ziel jener Massnahmen war die Behebung von konstruktiven Mängeln zur Erhaltung der Tragstruktur. Denkmalpflegerischen Aspekten wurde wenig Beachtung geschenkt.

### Status als internationales Baudenkmal verlangt vollumfängliche Erhaltung

Nachdem die Brücke 1991 zum internationalen Denkmal der Ingenieurbaukunst erklärt wurde, galt es, sie langfristig zu erhalten. Mit dieser Zielsetzung wurden die nächsten Instandsetzungsarbeiten geplant. Zusammen mit der Denkmalpflege wurden für die Erhaltung der Brücke die folgenden Grundsätze festgelegt:

- Der ideelle Wert der Brücke ist sehr hoch. Auf ihre Erhaltung könnte auch dann nicht verzichtet werden, wenn sie ausser Betrieb genommen würde.
- Die historische Substanz, insbesondere Material, Form und Oberfläche des Bauwerks, soll möglichst erhalten bleiben.
- Die Nutzung wird nicht verändert.

- Konstruktive Mängel sind im Hinblick auf eine langfristige Erhaltung zu beheben.
- Schadhafte Bauteile werden unter Einsatz moderner Technologien instand gesetzt; nur irreparable Teile dürfen ersetzt werden.

Die vorhandenen Nutzungseinschränkungen (geringe Brückenbreite, beschränkte Tonnage) waren in Anbetracht des geringen Verkehrs und des allgemeinen Zustandes der Strasse weiter tolerierbar, und eine Verstärkung des Tragwerks war nicht nötig. In konzeptioneller Hinsicht musste dem schädigenden Einfluss des Wassers und dem Schutz der Bewehrung besondere Beachtung geschenkt werden. Die Fugen im Bogenscheitel und über der Kämpferstütze wurden auf der Oberseite zubetoniert, das Meteorwasser sorgfältig gefasst und abgeleitet und die Abdichtung der Fahrbahnplatte erneuert. Wegen des rutschenden Hangs musste das Widerlager Schiers umgebaut werden.

Zum langfristigen Schutz der Bewehrung und um die zahlreichen Schadhafte Stellen an der Oberfläche ästhetisch befriedigend instand zu setzen, wurden bei praktisch sämtlichen sichtbaren Flächen 10 bis 20 mm Altbeton mit Hochdruckwasser abgetragen und an-

- *The historical substance, in particular regard to material, form and surface of the construction, should be preserved as far as possible.*
- *The requirements for use should not be changed.*
- *Structural defects should be remedied with respect to a long-term conservation.*
- *Damaged sections of the structure should be restored using modern technologies; only irreparable parts should be replaced.*

*The existing utilisation limitations (narrow bridge width, limited tonnage) were tolerable when considering the light traffic and the general condition of the road, and a strengthening of the structure was not necessary. In a conceptual aspect, the damaging effect of water and the protection of the reinforcement had to be taken into consideration. The joints in the crown and over the arch springing were concreted in, the rainwater was carefully collected and drained off, and the waterproofing of the bridge deck replaced. Due to the unstable hillside, the abutment on the Schiers side had to be rebuilt.*

*In order to ensure the long-term protection of the reinforcement and to aesthetically satisfactorily repair the numerous damaged lo-*





Die Salginatobelbrücke nach Beendigung der Erhaltungsmaßnahmen.  
*The Salginatobel bridge after completion of the maintenance work.*

schliessend mindestens 30 mm Spritzbeton appliziert. Der Charakter von geschaltem Beton konnte bewahrt werden, indem am frischen, noch weichen Spritzbeton eine Brettstruktur rekonstruiert wurde. Beim Ersatz der Brüstungen mussten die ursprüngliche Form, das unregelmässige Schalungsbild und auch die knappen Abmessungen so weit wie möglich erhalten bleiben (Bild 3).

Die Instandsetzungsarbeiten wurden in den Jahren 1995 und 1997/98 ausgeführt. Da die einzige Strassenverbindung nach Schuders über die Brücke führt, durfte der Verkehr nur für kurze Zeit unterbrochen werden. Für den Ersatz der Brüstungen war ein speziell konstruiertes Portalgerüst erforderlich. Für die Spritzbetonarbeiten am Bogen musste die Brücke fast vollständig eingehaust werden – während etwa eines halben Jahres glich sie einem Werk des Künstlers Christo (Bild 4). Die Kosten für die Erhaltungsmaßnahmen betragen 2,1 Mio CHF; davon wurden allein für Gerüste mehr als 300 000 CHF ausgegeben.

Die instand gesetzte Salginatobelbrücke (Bild 5) ist wahrlich ein imposantes Bauwerk; der Aufwand für die langfristige Erhaltung hat sich gelohnt. ●

*cations on the surface, in practically every visible area 10 to 20 mm of old concrete were removed using high-pressure water, and a layer of 30 mm of shotcrete was subsequently applied. The character of the removed concrete could be maintained by applying formwork to the shotcrete while still soft and fresh. When replacing the safety barriers, the original shape, the irregular forming and also the skimpy dimensions had to be taken into consideration as far as possible (fig. 3). The rehabilitation work was carried out in 1995 and in 1997/98. Since the only road link to Schuders was over the bridge, the traffic could only be interrupted for a short period of time. For the safety barrier replacement a specially constructed gantry scaffold was necessary. For the shotcrete work on the arch, the bridge had to be almost completely enclosed – for almost half a year it looked like one of Christo's works of art (figure 4). The costs of the rehabilitation work were 2.1 million CHF, of which the cost of the scaffolding alone was more than CHF 300,000.*

*The restored Salginatobel bridge (figure 5) is truly an imposing structure, the expenses for the long-term conservation are worthwhile.* ●

**Verfasser/Author**

Heinrich Figi  
 dipl. Bauing. ETH  
 Tiefbauamt Graubünden  
 Grabenstrasse 30  
 CH-7000 Chur  
 heinrich.figi@tba.gr.ch



Eugen Brühwiler

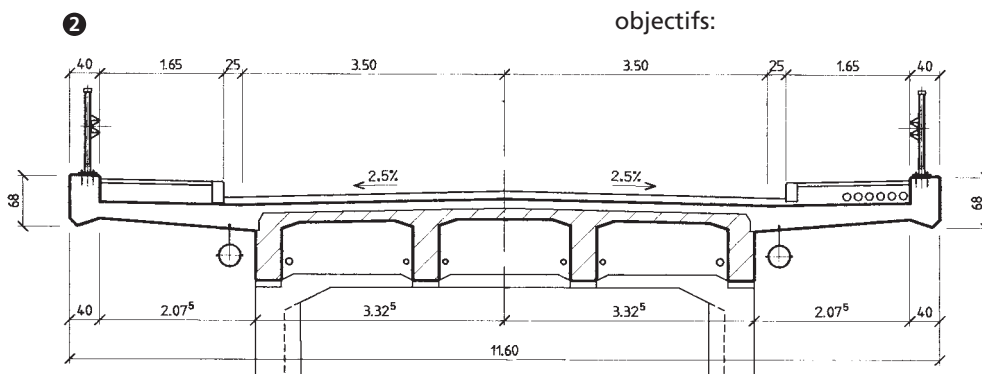


1 Situation du pont sur le Javroz.  
The Javroz bridge and its surroundings.

### Historique et description de l'ouvrage

Le Pont sur le Javroz situé près de Charmey (canton de Fribourg) a été construit en 1950 pour remplacer un pont-arc en acier. Réalisé en béton armé, la longueur totale du pont est de 169 m, l'ouverture du double arc encastré est de 87 m et la hauteur du tablier au-dessus du fleuve est de 55 m (figure 1). Le tablier constitué d'une dalle avec 4 longerons est supporté par 13 paires de piles. Le tablier était muni à l'origine, au-delà des piles sur les naissances de l'arc, d'une poutre Gerber avec joints de dilatation. La chaussée offrait à l'origine une largeur de 6 m et était flanquée de 2 trottoirs de 1,05 m.

Section du tablier élargi.  
Section of the enlarged deck.



Le pont de Javroz est un témoin marquant de son époque, de par son élégance, sa légèreté et son intégration dans le site.

### Exigences et évaluation de l'état

Pour répondre à de nouvelles exigences de la planification routière, la chaussée devait être élargie de 8.4 m à 11.6 m (figure 2), et, par conséquent, la sécurité structurale du tablier n'était pas suffisante face aux charges du futur trafic routier et à l'augmentation du poids propre du tablier d'environ 60%. Les autres éléments de la structure présentaient une réserve suffisante de capacité portante.

Après 50 ans de durée de service, l'ouvrage montrait des dégâts de corrosion d'armatures dus à l'utilisation de sels de déverglaçage. Les dégâts de corrosion visibles se concentraient sur les appuis des poutres Gerber dont les joints n'étaient pas étanches, et sur les piles qui étaient flanquées de conduites d'évacuation des eaux de chaussée, endommagées pendant plusieurs années, laissant l'eau et des quantités importantes de sels se déverser sur les piles. En plus, la face supérieure de la dalle de roulement, qui n'était pas protégée avec une étanchéité, montraient des armatures fortement corrodées, mais exclusivement dans les points bas.

### Projet d'intervention

Les interventions avaient deux objectifs:

#### Caractéristiques du projet

##### Maître de l'ouvrage

Etat de Fribourg, Département des ponts et chaussées, représenté par Knud Sunier

##### Auteur du projet et direction locale des travaux

Benoît Stempfeli Ingénieurs Conseils SA, Fribourg, Alain Rime et Benoît Stempfeli

##### Entreprises

Consortium Repond SA, Charmey, Zschokke, Fribourg, et Bätigrup, Fribourg

##### Précontrainte

AVT SA, Tafers

##### Experts

Eugen Brühwiler, EPFL, et H.U. Frey, Frey & Associés, Lausanne

### History and description of the Javroz bridge

The Javroz bridge, located near Charmey in the canton of Fribourg, was built in 1950 to replace an existing steel arch bridge. It is a twin-arch reinforced concrete bridge and has a total length of 169 m. The clear span of the arch is 87 m and the bridge deck is 55 m above the water (figure 1). The deck is a one-way slab with four longitudinal ribs and is supported by 26 spandrel columns grouped in pairs. The deck was originally separated by means of Gerber beams and expansion joints located above the arch abutments. Initially the wearing surface was 6 m wide and had sidewalks, 1.05 m wide, one on either side.

The Javroz bridge is typical of bridges built in this time period, with respect to its elegance, lightness and integration into its surroundings.

### Structural demands and bridge condition

Due to changes in traffic routing, the deck width of the Javroz bridge had to be increased from 8.4 m to 11.6 m (figure 2). The combination of the associated increases in traffic loads and dead load (60%) rendered the structural safety of the bridge deck inadequate. The rest of the structure, however, had sufficient reserve load carrying capacity.

At the time of deck enlargement the bridge, after over 50 years of service, was also showing signs of

## Project data

### Owner

Canton of Fribourg, Departement for bridges and roads represented by K. Sunier

### Design engineer and site management

Benoît Stempfél Ingénieurs Conseils SA, Fribourg, A. Rime and B. Stempfél

### Contractor

Consortium Repond SA, Charmey, Zschokke, Fribourg, and Bâtigroup, Fribourg

### Post-tensioning

AVT Ltd., Tafers

### Experts

E. Brühwiler, Swiss Federal Institute of Technology (EPFL), and H.U. Frey, Frey & Associés, Lausanne

- l'élargissement du tablier nécessitant son renforcement
  - la remise en état du béton armé
- L'intervention devait assurer la pérennité du pont sans modifier significativement son aspect. Comme l'ouvrage est le seul accès à une vallée, une voie de circulation a dû rester ouverte pendant toute la durée du chantier. L'idée de supprimer la cause des dégâts principaux, à savoir le système des poutres Gerber avec les joints, s'imposait. Cette solution modifie fondamentalement le système statique du pont, mais elle permet simultanément le renforcement du tablier au moyen d'une précontrainte extérieure. Les interventions suivantes ont été exécutées (figure 3):
- suppression des poutres Gerber et clavage du tablier pour obtenir un tablier sans joint sur sa longueur totale de 169 m
  - mise en place d'appuis glissants et de joints de dilatation aux culées ainsi que transformation des culées afin de les rendre accessibles
  - démolition des consoles existantes et de la face supérieure du tablier, puis construction du tablier élargi, en deux étapes transversales
  - mise en place de la précontrainte longitudinale extérieure
  - remise en état du béton armé.

## Particularités

### Modification du système statique

Les dilatations thermiques du tablier imposent aux piles proches des culées, qui sont les plus

chloride-induced corrosion. There was visible corrosion damage concentrated near the supports of the Gerber beams, where the expansion joints were not waterproofed, and on the spandrel columns next to drainage conduits, damaged during several years, thus exposing the spandrel columns to both water and significant amounts of deicing salts. There was also significant corrosion of the deck slab reinforcement at low points of the deck. The deck slab was not initially waterproofed.

## Intervention

The general objective of the intervention was to assure the future functionality of the bridge without modifying significantly its appearance. The two specific objectives of the intervention were:

- to enlarge the deck, requiring additional reinforcing of the structure
- to restore the reinforced concrete

It was decided to remove the expansion joints next to the Gerber beams, the area of the bridge most susceptible to damage. The removal of these joints fundamentally modified the structural behaviour of the bridge, but allowed for strengthening of the deck by means of exterior prestressing. During the entire intervention it was necessary to keep one traffic lane open, as the Javroz bridge is the only access to the valley.

The specific actions of the intervention were (figure 3):

- the removal of the Gerber beams and expansion joints in the deck above the arch abutments
- the modification of the abutments by adding sliding supports, expansion joints and making the abutment accessible
- the removal of the existing cantilever slab and top surface of the deck and the addition of the enlarged deck, done in two transversal stages
- the installation of the exterior longitudinal prestressing

- the rehabilitation of the reinforced concrete.

## Interesting details

### Modification of structural behaviour

The thermal movements of the deck cause significant movement in the shortest spandrel columns. The structural design, however, allows for the heads of these spandrel columns to crack, i.e., alone the normal force in the spandrel columns must be carried. The arch has only a slight modification of its loading because the centre of the deformations was only displaced a few metres.

### Enlargement of the deck

Approximately 6 cm of chloride-contaminated concrete was removed from the deck surface. New concrete was then added, increasing the deck thickness to a total of 25 cm, leaving 13 cm of concrete layer for the transversal reinforcement (figure 4).

In a structural element composed of old and new concrete such as the enlarged deck (figure 2), tensile stresses are created in the new concrete due to cement hydration. The magnitude of these stresses depends on the degree of restraint of the new section, the difference between the tempera-



Vue du pont après l'intervention.  
View of the bridge after the intervention.



4  
Bétonnage du tablier élargi.  
*Pouring of concrete for the enlarged deck.*

courtes, des déformations importantes. La structure permettait d'admettre que ces piles se fissurent à leur tête pour recentrer ainsi l'effort normal. L'arc ne subit que peu de modifications de ses sollicitations car il est quasi centré et le centre de déformation n'est déplacé que de quelques mètres.

#### Elargissement du tablier

L'enlèvement d'environ 6 cm de béton contaminé de chlorures et l'augmentation de l'épaisseur du tablier à 25 cm laissaient 13 cm pour la mise en place de la forte armature transversale (figure 4). Dans un élément structural composé d'ancien et de nouveau béton tel que le tablier élargi (figure 2), des contraintes de traction sont engendrées dans le nouveau béton dues à l'hydratation du ciment. L'amplitude de ces contraintes dépend avant tout du degré d'entrave de la nouvelle



5  
Pont sur le Javroz après l'intervention.  
*General view of the bridge after the intervention.*

section, de l'évolution de la différence de température entre le béton durcissant et la température ambiante ainsi que du retrait endogène. Ces contraintes de traction peuvent provoquer la fissuration dans la bordure et la dalle en porte-à-faux au jeune âge. Ces fissures sont souvent traversantes et peuvent être néfastes pour la durabilité du tablier. Parmi les mesures envisageables, l'utilisation de conduite de refroidissement s'est montrée la mesure la plus efficace pour limiter la fissuration. Le comportement du tablier élargi au jeune âge a été simulé et l'efficacité de la conduite de refroidissement validée à l'aide d'un modèle numérique. Le résultat obtenu est qu'aucune fissuration de la dalle en porte-à-faux a été observée au jeune âge.

#### Précontrainte extérieure

La géométrie rectiligne en plan permettait de placer une précontrainte extérieure d'un tracé rectiligne et d'une force totale de 14 MN, sans coupleur sur les 169 m de longueur du tablier. Les culées accessibles permettaient la mise en tension de la structure et le contrôle ultérieur. L'introduction des forces d'ancrage a nécessité le renforcement des extrémités du pont.

#### Remise en état du béton armé

Seules les zones montrant de la forte corrosion des armatures ont été traitées par hydrodémolition et ragréage. Pour le reste, la résistance à la corrosion des armatures a été améliorée par application d'un inhibiteur de corrosion.

#### Conclusion

L'élargissement et la remise en état du pont sur le Javroz, réalisés pour 5,9 millions de francs suisses, concentrent plusieurs solutions techniques et constructives modernes pour répondre aux multiples défis posés. Sur le plan esthétique, le pont a gagné en élégance par la proportion de ses nouveaux porte-à-faux (figure 5). Il reste ainsi pour un long avenir un ouvrage digne de son site. ●

*ture of the hardened concrete and the ambient temperature, and the amount of endogeneous shrinkage. These stresses can cause cracking in the initial hardening phase (early age) in the kerb and the cantilever slab. The cracks are often through-cracks that can be detrimental to durability. In the present case, the most effective measure to reduce cracking in early age concrete was the use of cooling tubes embedded in the concrete. The effectiveness of the cooling tubes was investigated using numerical simulations of the behaviour at early age of the enlarged deck. The use of cooling tubes ensured that no cracks occurred in the kerb and cantilever deck slab at early age.*

#### Exterior prestressing

*The geometry of the bridge in plane allowed the placing of continuous rectilinear exterior prestressing, with a total force of 14 MN, for the entire length of the bridge deck (169 m). The accessibility of the abutments allowed for post-tensioning of the structure. The ends of the bridges had to be reinforced to anchor the post-tensioning cables.*

#### Rehabilitation of reinforced concrete

*The cover concrete in the zones showing signs of severe corrosion of the reinforcement was removed by hydrodemolition and restored. A corrosion inhibitor was applied to improve the resistance against rebar corrosion in the rest of the concrete structure.*

#### Conclusion

*The enlargement and rehabilitation of the Javroz bridge, for 5.9 million Swiss francs, required a number of unique technical solutions to deal with the multiple challenges faced. The new proportions of the cantilevers improved the elegance of the bridge (figure 5). It now has a long future worthy of its location. ●*

#### Auteur/Author

Eugen Brühwiler  
Prof., Dr. ès sc. techn., ing. civil dipl. EPF  
eugen.bruehwiler@epfl.ch  
Address: EPFL – MCS  
Swiss Federal Institute of Technology, CH-1015 Lausanne