



Brücken und Ingenieurbau

Ponts et génie civil

Bridges and Civil Engineering



Troisième pont sur le Bosphore – un chef d’œuvre d’ingénierie structurale

Third Bosphorus bridge – a masterpiece of sculptural engineering

Jean-Francois Klein, Michel Virlogeux, Thierry Delémont, Vincent de Ville de Goyet

Introduction

Le 3^{ème} pont sur le Bosphore (pont Yavuz Sultan Selim), récemment achevé et lauréat du fib Award for Outstanding Structures 2018, offre une nouvelle connexion entre l’Europe et l’Asie et fait figure de nouveau symbole de la région d’Istanbul.

La raison n’en est pas uniquement liée à son emplacement, mais également à sa structure et à son histoire. Jamais encore une structure aussi audacieuse n’avait été étudiée et exécutée ainsi, selon une ligne de conduite stricte qui débuta le jour de l’attribution du contrat au consortium ICA (İçtaş/Astaldi), sur la base du projet considéré par les autorités comme étant celui qui apportait la meilleure réponse au cahier des charges. Un projet développé pendant une période de concours de seulement huit semaines.

Les exigences du cahier des charges étaient très élevées, au niveau requis pour une structure de cette importance du point de vue son utilisation, de son contexte géopolitique et de son impact économique.

Cahier des charges

Pressentant que cet ouvrage allait devenir un symbole, les autorités ont exprimé leurs attentes esthétiques, en plus de leurs exigences de fonctionnalité de l’ouvrage. Les principales exigences du cahier des charges ont été les suivantes:



Cette plaque de bronze sera exposée sur le troisième pont sur le Bosphore. This bronze plaque will be displayed on the third Bosphorus bridge.

Introduction

The recently completed strategic connection between Europe and Asia, the third Bosphorus bridge (Yavuz Sultan Selim Bridge), winner of the 2018 fib Award for Outstanding Structures, was immediately acknowledged as a new landmark and icon of the Istanbul region.

The reason for this is not only its location but, of course, the nature of the

structure itself and the history of its development. Never has such an audacious and challenging structure been delivered, following such a strict and incredibly tight construction programme, with the starting point for the contractor, the ICA joint venture (İçtaş/Astaldi), being based upon a scheme worked out during a competition period of only 8 weeks, a design selected by the authorities on the basis of its meeting their requirements in the most satisfactory way.

And the requirements were very high, exactly at the level prerequisite for such an important structure, considering not only its serviceability but also its geopolitical context and its economic importance.

Requirements

As it was clear from the beginning that the bridge would become an important symbol, the authorities stressed their interest in seeing an appropriate aesthetic consideration, albeit that this is somewhat

- En considérant la largeur de navigation et les conditions bathymétriques locales, la portée minimale de l’ouvrage devait être de 1275 m.
- Le pont devait supporter 2 x 4 voies d’autoroute en plus de 2 voies de chemin de fer et 2 trottoirs pour l’accessibilité et la maintenance.
- L’ouvrage devait être un pont suspendu.
- L’esthétique de l’ouvrage serait un critère de jugement essentiel et la ligne architecturale des deux ponts existants sur le Bosphore devait être respectée.
- Le pont devait être construit en 36 mois, après 6 mois de préparation.

Conception

Répondre à l’ensemble de ces exigences avec une structure à la fois efficace et élégante a représenté un gros défi à relever dans un délai extrêmement court. Nous avons déployé toute notre créativité pour concevoir une structure à la fois plaisante et élégante, qui répondrait au niveau d’exigence requis par ce nouveau symbole. Le résultat est une pure œuvre d’art en ingénierie structurale.

Le point de départ a bien évidemment été d’étudier l’architecture des deux premiers ponts sur le Bosphore et de mesurer l’impact des charges ferroviaires sur un ouvrage d’une telle portée.

Le design des deux premiers ponts a été choisi, lors de leur construction, pour son élégance. Ils sont directement inspirés du pont sur la Severn, dont la construction s’est achevée peu avant la construction du premier pont, et qui révolutionna la conception des ponts suspendus par l’utilisation d’un tablier orthotrope aérodynamique.



Fig. 1

Premier pont sur le Bosphore (1973) – Istanbul, une des premières applications des tabliers minces.
First Bosphorus bridge (1973) – Istanbul, an early application of streamlined box girder.



Fig. 2

Impact architectural de la solution classique d'un tablier à deux étages.
Architectural impact of the double deck classical suspension bridge solution.
(© ZENsan)

subjective, in parallel with meeting the functional requirements for the structure.

The main requirements were:

- In response to the necessary safety width for the navigation channel and the local bathymetric configuration, the minimum required span was specified as 1,275 m.
- The bridge had to carry 2 x 4 lanes of roadway in addition to 2 railway tracks and 2 sidewalks for accessibility and maintenance.
- The bridge had to be a suspension bridge.
- Aesthetic qualities were considered to be essential in the assessment of the proposals and the new bridge should

Les deux premiers ponts sont ainsi remarquables par la finesse de leur tablier qui enjambe le détroit sous la forme d'un trait fin (Fig. 1). Ces considérations nous ont inspiré pour éliminer d'entrée une solution de pont haubané (par ailleurs exclue par le cahier des charges) et développer notre projet de pont suspendu avec pour objectif l'utilisation d'un tablier mince avec toutes les circulations sur un seul niveau. Il nous fallait cependant encore prendre en compte les incidences des charges ferroviaires, élément critique pour un ouvrage d'une telle portée.

Il n'existe que très peu de ponts suspendus ferroviaires de par le monde. Dans ces ouvrages, l'importante rigidité nécessaire a été systématiquement obtenue au moyen de tabliers à deux niveaux, composés de treillis de grande hauteur (12–15 m), très éloignés de l'élégance des deux premiers ponts sur le Bosphore (Fig. 2).

Un pont suspendu classique, avec son tablier relativement flexible, n'est pas adapté aux charges ferroviaires: lorsque le train se situe environ au quart de la portée, les câbles principaux se déplacent vers le bas au droit de la charge et vers le haut du côté opposé, ce qui induit d'importantes déflections du tablier, incompatibles avec les exigences opérationnelles du trafic ferroviaire.

acknowledge the architecture of the two existing bridges crossing the Bosphorus.

- The bridge had to be completed within a period of 36 months, following 6 months of preparation.

Conceptual design

Combining all these requirements in an elegant and efficient structure was an incredible challenge to be completed within an extremely short competition time. We used all our creative and innovative spirit to produce the best, most pleasant and elegant design, of a quality at the level required by this new and important symbol. The result is a pure sculptural engineering artwork.

The starting point was, of course, to consider and study the architecture of the two existing bridges and to measure the impact of the heavy train loads on such a long span structure.

The designs of the two existing bridges were selected at the time of their construction for their elegance. They were directly inspired by the design of the Severn suspension bridge, which was a revolution in the design of suspension bridges, incorporating a streamlined, orthotropic box girder for the deck, and was completed shortly before the first Bosphorus Bridge was constructed.



Fig. 3

Troisième pont sur le Bosphore: un pont suspendu à haute rigidité.

Third Bosphorus bridge: a highly rigid suspension bridge.

Pour résoudre ce problème tout en conservant un tablier mince, nous avons cherché la rigidité nécessaire dans le système de câblerie, plutôt que dans le tablier, en ajoutant des câbles de rigidification proches des mâts (Fig. 3). Cette idée n'est pas nouvelle et a été développée dans les années 1870 par John Roebling lors de la conception du pont ferroviaire de Niagara, avec un tablier en bois à deux étages, trop souple pour résister seul. Cette solution a ensuite été utilisée plusieurs fois, en particulier pour le pont de Brooklyn ou d'autres ponts plus petits aux États-Unis, en France, au Royaume Uni ou plus récemment en Chine avec un tablier en béton très élancé.

La conception s'est poursuivie par le dessin des mâts aux formes dynamiques et élégantes, exempts de toutes traverses intermédiaires sur leur hauteur (Fig. 4). La section triangulaire et l'inclinaison des jambes procurent une impression de stabilité et de force, malgré leur élancement.

L'inclinaison des jambes a été choisie de manière à placer le plan vertical des câbles de suspension et des suspentes entre la

Both bridges are remarkable for their extremely slender deck over-crossing the strait in the shape of a simple narrow line (Fig. 1). This was our main inspiration and motivation to immediately discard a cable-stayed solution (by the way, prohibited by the requirements) and to develop our project as a suspension bridge with the objective to go for a streamlined, slender box girder with a single level for both traffics. But we had to face the consequences of the heavy train loads which is a critical point for such a long span bridge.

In fact, there are very few long span railway suspension bridges throughout the world. In those bridges, the extremely high demand for rigidity has been systematically achieved by designing double decked trusses, which are very high (12–15 m) and visually heavy (Fig. 2), far from the elegance of the existing Bosphorus bridges.

However, a classical suspension bridge with a rather flexible deck is not adapted to the heavy and concentrated train loads: when the train is at about quarter span, the suspension cables move down

route et le rail. Ceci permet d'obtenir une vue latérale complètement dégagée dans toute la zone centrale pour les automobilistes, transformant la traversée du détroit en une expérience spectaculaire.

L'ancrage latéral des haubans en travée centrale et entre la route et le rail en travées de rives met en scène la traversée du détroit. La lumière naturelle du site jouera en permanence avec les effets produits par les lignes géométriques des haubans (Fig. 5).

C'est ainsi, pour faire simple, que nous avons développé ce concept exceptionnel. Pour notre part, nous avons découvert au cours des études un nouveau type de pont, très différent d'un pont suspendu classique ou d'un pur pont haubané.

Géométrie générale, dimensions principales

Pendant le concours, nous avons proposé à l'entreprise d'augmenter la portée de l'ouvrage à 1408 m, afin de positionner les mâts sur les rives et ainsi mieux s'adapter aux conditions locales: pas d'impact sur la navigation, pas de risque de pollution pendant la con-



Fig. 4

Forme pure et dynamique des mâts.
Dynamic and pure shapes for the tower legs.

under the load and up on the opposite side, with a limited efficiency producing large deflections, not compatible with the train's operational requirements.

To solve this problem and remain with a streamlined box girder, we looked for an additional global stiffness in the cable system instead of the girder, which was achieved by adding stiffening cables close to the towers (Fig. 3). This idea is not new and had been developed in the 1870's by John Roebling when designing the Niagara railway suspension bridge, with a wooden double deck, too flexible to resist train loadings on its own. It has been used several times since then, for example for the Brooklyn Bridge and for some smaller bridges in the United States, France and the UK. More recently, the approach was adopted in China with a very slender concrete deck.

In addition, the conceptual design was developed by working out an especially dynamic and elegant shape for the towers, avoiding any intermediate crossbeam within their height (Fig. 4). The triangular-shaped and inclined legs produced a stable and strong impres-

sion despite their slenderness. The inclinations of the legs were fixed to align the vertical plane of the main cables in between the roadway and the railway, placing the hangers in the central zone of the deck. This allows a completely free lateral view for car users on all the central suspended part, which turns the crossing of the strait into a dramatic experience. By anchoring the stiffening cables laterally in the main span and between the railway and the roadway on the back spans, it highlights the crossing of the strait. The natural light at the site will play with the effect produced by the progressive stiffening cable line geometries along the bridge (Fig. 5).

Matériaux

Tous les matériaux ont été sélectionnés pour une utilisation optimale de leurs qualités, tout en prenant en compte les expériences locales et les possibilités d'approvisionnement, ainsi que la situation géographique particulière de l'ouvrage, dans une région de haute séismicité.

This is, simply explained, how we developed this exceptional design. For us, having developed this concept during the competition, we also discovered a new type of bridge, far away from a classical suspension bridge or a pure cable stayed bridge.

General layout, main dimensions

During the competition phase, we proposed to the contractor to

Principaux intervenants/ Main participants
Propriétaire/Owner
KGM – Ministère des transports, Turquie
Concessionnaire et entreprise principale/Concessionnaire and main contractor
ICA – JV İçtaş Insaat, Turquie/ Astaldi Spa, Italie
Entreprise générale (pont principal)/ General contractor for the main bridge
HDSK – JV Hyundai E&C/SK E&C, Corée du Sud
Conception/Conceptual design
Jean-François Klein (T engineering intl), Michel Virlogeux (Consultant)
Études structures/
Structural engineering
T engineering intl, Suisse
Sous-traitants études/Subconsultants structural engineering
Greisch, Belgique – Lombardi, Italie – Grid, Portugal – CSTB, France – Temelsu, Turquie – Politecnico di Milano, Italie – Envico, Corée du Sud

Les fondations, piles, mâts et travées de rives sont en béton, essentiellement C60. La travée principale est constituée d'un tablier en caisson orthotrope en acier. La majorité de l'acier structural est de qualité S460.

Les câbles principaux sont constitués de paquets préfabriqués de fils parallèles (PPWS) de 5,4 mm en qualité 1860 MPa. Ils sont protégés par un revêtement de zinc et un système de déshumidification. Les suspentes sont constituées de fils parallèles (PWS) de 7 mm en qualité 1770 MPa, revêtus de zinc et protégés par une gaine en PE. Du fait de leur longueur exceptionnelle (plus de 600 m pour les plus longs), les haubans sont constitués de torons de 15,7 mm en nuance 1960 MPa, afin de limiter leur poids et les flèches qui en résultent.

La répartition des longueurs des zones haubanées, suspendues et de transition vise à obtenir l'optimum entre la rigidité d'ensemble, le comportement longitudinal et transversal de l'ouvrage, la hauteur des mâts, l'efficacité des haubans en fonction de leur longueur, la rapidité de construction et bien sûr le coût global de l'ouvrage. Ces choix ont été remis en cause à plusieurs reprises pendant les études.

increase the length of the main span to 1,408 m, in order to place the towers on shore for a perfect accommodation of the specific site conditions, resulting in no impact on navigation, no risk of pollution during the construction of piers in the Bosphorus and no influence on the environment (currents, fishing, water quality, etc.). The goal was also to secure the programme with less erection risks than with offshore foundations. That was not an easy decision for the contractor but ICA decided to accept the proposal and it ended up as one of the foremost good decisions taken during the competition.

The height of the pylons is 322 m above ground level for the European side and 318 m for the Asian side. The main cables cross the pylon axis at a height of 307 m above sea level (Fig. 6).

The total width of the deck is 58.5 m with a functional cross-section as showed in Figure 7.

Constitutive materials

To complete the sculptural engineering process, all the constitutive materials were chosen for their best use, considering also the local practices and procurement possibilities and the special geographical situation of the bridge in a sensitive seismic area.

Impact de la durée de construction sur la conception

On peut raisonnablement admettre qu'un ouvrage d'une telle ampleur nécessite habituellement environ deux ans d'études et quatre à cinq ans de construction. Ramener l'ensemble à 36 mois, plus 6 mois pour les études préliminaires et la préparation du chantier, a constitué un défi incroyable. C'est pourquoi la réduction de la durée de construction est immédiatement apparue comme l'un des critères les plus importants pour la conception de l'ouvrage. Il était bien sûr évident que ni l'architecture, ni le comportement structurel ou le concept global de l'ouvrage ne devaient en aucun cas souffrir des décisions et dispositions particulières prises pour réduire la durée de construction. Le concept de l'ouvrage doit être global et le problème de la durée de construction a été pris en compte comme un paramètre totalement intégré au processus de conception et qui ne devait en aucun cas prétériter l'équilibre ou l'esthétique de l'ouvrage.

Notre philosophie de conception décrite précédemment a été naturellement complétée par les règles que nous estimons essentielles pour permettre d'aboutir au succès architectural et technique d'un projet :



Fig. 5

Impression visuelle de la géométrie des haubans.

Visual impression of cable geometry.

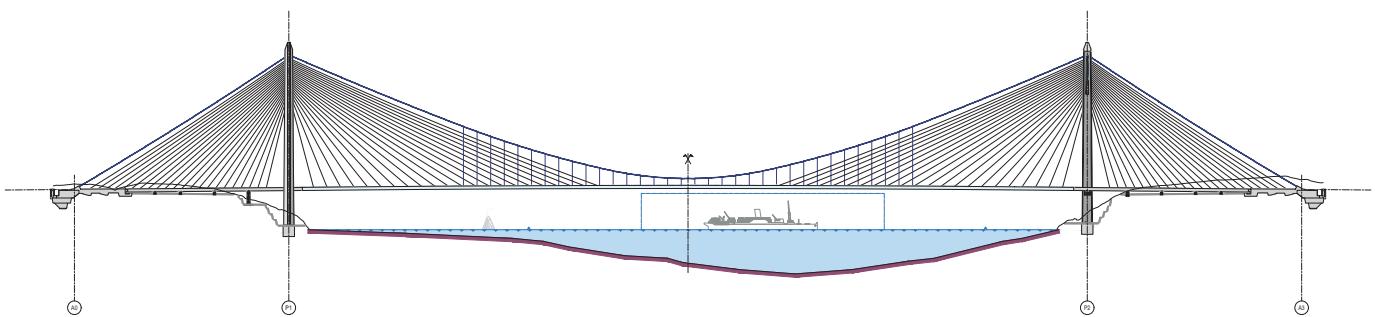


Fig. 6
Élevation de l'ouvrage.
Longitudinal elevation.

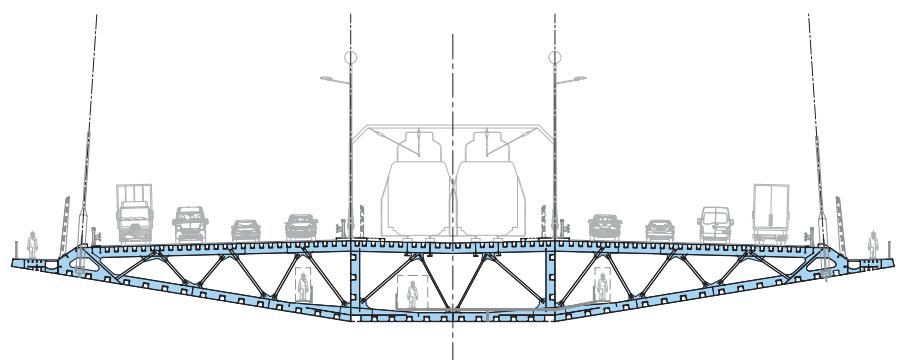


Fig. 7
Coupe fonctionnelle – largeur 58,5 m.
Functional cross-section – width 58.5 m.

The foundations, piers, towers and side spans are made of concrete, mainly C60. The main span is a fully orthotropic steel box girder. Most of the structural steel is grade S460.

The main cables are prefabricated parallel wire strands (PPWS) with 5.4 mm wires in grade 1,860 MPa. They are protected by zinc coating and a dehumidification system. The hangers are parallel wire strands (PWS) with 7 mm zinc coated wires in grade 1,770 MPa, protected by polyethylene sheathing. Due to their exceptional length (more than 600 m for the longest), the stiffening cables are standard 15.7 mm strands in grade 1,960 MPa to limit their self-weight and associated sag.

The choice of the respective lengths between the stiffened zone, the transition zone and the suspended zone was made by seeking an optimum between overall stiffness, behaviour of the bridge longitudinally and transversally, pylon height, limited effectiveness of the stiffening cables due to their length, speed of construction and, of course, the overall cost. These choices were challenged several times during the design process.

- Privilégier la logique structurale
- Privilégier la simplicité
- Privilégier l'utilisation de matériaux locaux et les expériences constructives locales
- Prêter une attention particulière à la relation de la structure avec son environnement et son utilisation.

Comme expliqué précédemment, le concept global du pont hybride a été dicté par les cas de charges sévères et les états limites d'utilisation requis par le système ferroviaire.

Globalement, la structure hybride aide à la réduction de la durée de construction dans la mesure où elle implique une simultanéité des activités. Il n'existe pas de chemin critique évident pour l'ensemble de la construction, de nombreuses opérations pouvant se dérouler simultanément, ce qui permet d'optimiser la durée de construction.

Pour un pont suspendu classique, le chemin critique est très clair : les mâts et leurs fondations ainsi que les massifs d'ancre doivent être achevés sur les deux rives avant de débuter les travaux préparatoires nécessaire à l'installation des câbles principaux. Ce

Impact of the construction time on the design

Ordinarily, the detailed design and construction of such an outstanding structure of this scale might require about 2 years of design studies and a construction period of 4–5 years. Reducing all the processes to 36 months plus about 6 months for the preliminary design and the preparation work was a tremendous challenge.

As a consequence, the reduction of the construction time immediately became one of the most relevant and governing criteria for the design. It was, of course, obvious that the architecture, the structural behaviour and the global concept of the bridge would not have to suffer from decisions or specific methods developed only to reduce the construction time. The concept is global and we considered the problem of construction time as an integrated parameter which should definitely not alter the equilibrium or the aesthetics of the bridge.

Our design philosophy, described above, was, of course complemented by what we consider to be essential rules leading to the architectural and technical success of a project:

Jean-François Klein nous a quitté le 25 avril après une longue lutte contre la maladie. Son combat, mené avec un grand courage, a duré plus de dix huit mois, avec des périodes de souffrance extrême et des périodes d'espérance.

Jean-François a fait ses études de génie civil à l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne, où il a notamment été l'élève de René Walther dont il est devenu l'un des assistants. Il a obtenu son diplôme d'ingénieur en 1985 et défendu sa thèse de doctorat en sciences techniques en 1990. Il a ainsi participé à ses cotés à plusieurs projets, en particulier ceux des ponts de Zaltbommel aux Pays Bas et de Skarnsund en Norvège.

En 1993 il décide de rejoindre le bureau Tremblet à Genève – aujourd'hui T-Ingénierie – et en devient l'un des associés en 1995. Par sa compétence, son dynamisme et ses qualités humaines, il a largement contribué au développement de ce bureau et à l'atmosphère de confiance et d'amitié qui y règne.

Au sein de ce bureau il a dirigé ou participé à de nombreux projets en Suisse et à l'étranger, comme la Halle 6 de Palexpo au-dessus de l'autoroute et le nouveau Stade de Genève. Il a conçu le projet de Franchissement de la Rade, en 1996, choisi par le Jury mais qui n'a pas été construit. On peut aussi citer le Pont de la Ravine Fontaine sur l'île de la Réunion, et surtout le Troisième Pont sur le Bosphore.

Jean-François a été très actif dans les associations internationales où il s'est fait de très nombreux amis, en particulier la Fédération Internationale du Béton. Jean-François a participé à la rédaction du Guide pour une bonne conception des ponts, et il a présidé la Commission 1, sur la conception des ouvrages, pendant de longues années. Plusieurs prix ont reconnu ses mérites :

- 1996, prix de l'AFPC
- 2010, fib Special Mention for Outstanding Structures for the replacement of the Geneva airport runway
- 2010, European Award of the Steel Industry for the Ravine Fontaine Bridge
- 2013, fib Medal of Merit
- 2018, fib Award for Outstanding Structures for The Third Bosphorus Bridge, Exceptional Recognition
- 2018, fib Freyssinet Medal
- 2018, Grand Prix Freyssinet

Jean-François était un homme d'une grande gentillesse, d'une grande honnêteté. Un grand ingénieur. Mais c'est surtout un ami fidèle que nous avons perdu.

Michel Virlogeux

Jean-François Klein passed away on April 25, after a long fight against disease. He fought with great courage for more than eighteen months, with periods of extreme pain and periods of hope.

Jean-François gained his civil engineering education at the Lausanne Ecole Polytechnique Fédérale (EPFL), where he graduated in 1985 and obtained his PhD in Technical Sciences in 1990. He then became one of the assistants of Professor René Walther, taking part with him in several projects, particularly the Zaltbommel Bridge in the Netherlands and the Skarnsund Bridge in Norway.

In 1993 he decided to join the Tremblet design office in Geneva, later T-Ingénierie, of which he became a partner in 1995. Thanks to his expertise, his enthusiasm and his human qualities, he contributed greatly to the development of this design office and to its atmosphere of trusting relationships and of friendship.

Within this design office he headed up or took part in many projects, in Switzerland and outside, such as Hall 6 of Palexpo, erected above the motorway from Geneva to Lausanne, and the new Geneva Airport. He was the designer of the bridge project to cross Lake Geneva in 1996, awarded by the Jury but which has not been built for political reasons. Worthy of mention are the Ravine Fontaine Bridge, on the french island of Réunion in the Indian Ocean, and, more recently, the third Bosphorus bridge.

Jean-François was extremely active in international associations in which he counted many good friends, in particular the Fédération Internationale du Béton. Jean-François took part in the publication of the fib Guidance for Good Bridge Design, and was, for many years, the Chairman of Commission 1, devoted to the design and construction of concrete structures.

He won several awards in recognition of his merits:

- 1996, prix de l'AFPC (medal of the French Association of Civil Engineering)
- 2010, fib Special Mention for Outstanding Structures for the replacement of the Geneva airport runway
- 2010, European Award of the Steel Industry for the Ravine Fontaine Bridge
- 2013, fib Medal of Merit
- 2018, fib Award for Outstanding Structures for The Third Bosphorus Bridge, Exceptional Recognition
- 2018, fib Freyssinet Medal
- 2018, Grand Prix Freyssinet

Jean-François was a man of extreme kindness and great honesty, a great engineer and, above all, a loyal friend whom we all miss.

Michel Virlogeux

n'est qu'ensuite que peuvent être installés les câbles, puis que démarre le montage du tablier.

Dans le cas présent, il n'y avait aucune raison d'attendre l'achèvement des mâts ou des massifs d'ancrage, ni l'installation des câbles principaux, pour commencer à mettre en place les premiers éléments de tablier.

Seuls les travées de rive et les mâts jusqu'au niveau des premières boîtes d'ancrage devaient être achevés. À ce stade, le montage des éléments de tablier pouvait commencer en encorbellement, comme sur un pont haubané classique, pendant que la construction des mâts et des massifs d'ancrage se poursuivait. Ceci bien avant que ne débute l'installation des câbles principaux.

C'est ainsi que lorsque les mâts ont été achevés, les selles de déviation posées, les travaux préparatoires effectués et les câbles principaux installés, le montage en encorbellement du tablier avait atteint une longueur d'environ 500 m de chaque côté (Fig. 8).

Lorsque le premier élément de tablier a été monté depuis les câbles principaux, plus des $\frac{2}{3}$ du tablier étaient déjà en place.

La partie centrale du tablier a finalement été montée en levant les éléments au moyen de poutres de lavage pouvant rouler sur les câbles et équipées de vérins à câbles (Fig. 9).

Conclusion

Cet ouvrage exceptionnel démontre l'efficacité de l'approche globale issue de la philosophie d'ingénierie sculpturale. Il n'est nul besoin d'artifices de décoration, de formes fantaisistes ou d'exercices d'équilibrisme pour le transfert des charges comme on en voit de plus en plus. La structure est attractive et exceptionnelle par elle-même et par son dialogue avec son environnement. Elle est non seulement facilement « lisible », mais elle exprime clairement sa logique et sa fonction par son intégration dans le site. C'est gage que son architecture perdurera au-delà des modes, sans être affectée par une obso-

- Prioritize the structural logic
- Provide simplicity
- Promote the use of local materials and local construction experience
- Pay particular attention to the relationship between the structure and its surroundings and to the type of use.

As explained above, the global concept of the hybrid bridge was dictated by the severe loading schemes and the critical operational limit states defined by the railway.

However, the hybrid system also helps with the global construction time as it naturally calls for simultaneous activities. Many operations can be performed at the same time, allowing for good overall construction time performance with the critical path less constrained by specific activities.

On a classical suspension bridge, the critical path is quite clear: pylon foundations, pylons and anchor blocks must be completed on both sides before starting installation of the temporary elements necessary to install the main cable. After that, the main cable and the cable bands can be installed and the erection of the main span deck can start.

Here, there was no reason to wait for completion either of the pylons or of the anchor blocks, or for the installation of the main cable or the cable bands to start the lifting of the first segments.

What was needed was the completion of the side spans and towers up to the first stiffening cable anchorages. From that point, the lifting of the segments could be started, as on a classical cable stayed bridge, while the towers could be completed, as could the anchor blocks and the ground approaches, all these operations being completed well before the installation of the main cable.

This means that once the towers had been completed and the saddles installed, the temporary work for the main cable installation could start and the main cable could be installed while the cable stayed deck was progress-



Fig. 8

Encorbellement de la zone haubanée avec installation des câbles principaux.
Cable stayed cantilevering during cable installation.



Fig. 9

Montage des éléments de la zone centrale au moyen de poutres de levage.
Erection of the central segments with lifting gantries.

lescence précoce. Le 3^{ème} pont sur le Bosphore, qui établit plusieurs nouveaux records mondiaux dont celui de la plus grande portée ferroviaire, va ainsi parfaitement jouer son rôle de nouveau symbole de la région d'Istanbul. Sa conception a requis l'utilisation des technologies et connaissances les plus avancées dans les domaines de l'ingénierie structurale, de

ing by cantilever over a length of 500 m on each side (Fig. 8). When the first segment was lifted from the completed main cable, more than $\frac{2}{3}$ of the deck length was already completed. The central part of the bridge was erected by lifting the segments with gantries rolling on the main cables and equipped with strand jacks (Fig. 9).

Conclusion

This exceptional bridge shows clearly the success and overall achievement made possible by applying the sculptural engineering philosophy. No need for any artificial decoration, fancy shapes or special equilibrium exercises for load transfer as regularly seen today. The structure is eye catching and outstanding by itself and by its dialogue with its context. It is not only easily "readable" but clearly shows its logic and function through its natural integration into the site and its dialog with its function. Its architecture will endure without aging and will not be affected by early obsolescence.

The third Bosphorus bridge, which breaks many world records, in particular that of the longest span for railway, will completely play its role as a new landmark for the city and an icon of Istanbul. It was designed using all the most up-to-date technology and knowledge in terms of advanced structural engineering, advanced computer calculations, material capacities and qualities, method of construction and durability concepts. General knowledge and understanding of the behaviour and the characteristics of the hybrid bridge form has made a huge step forward with this construction.

The design has proven its structural efficiency and its elegance. In comparison with a traditional suspension bridge of the same magnitude many advantages can be highlighted:

- Great architectural elegance and a contemporary suspension bridge
- In spite of the heavy trains, a slender single level deck could be applied as compared to the huge classical double decks
- Excellent aerodynamic shape of the deck
- Good seismic behavior, thanks to a good damping coefficient and high stiffness

l'analyse numérique, des matériaux, des méthodes de construction et des concepts de durabilité. Ce projet a ainsi permis à l'état des connaissances sur le comportement et les propriétés des ponts hybrides de faire un énorme bond en avant. Le concept a démontré son efficacité structurale et son élégance. En comparaison avec un pont suspendu traditionnel de dimension similaire, il présente de nombreux avantages :

- Un design de pont suspendu moderne et d'une grande élégance
- Un tablier mince malgré les importantes charges ferroviaires, en opposition aux énormes tabliers à deux niveaux des ponts suspendus classiques
- Une excellente forme aérodynamique du tablier
- Un bon comportement sismique grâce à un bon amortissement et à sa rigidité
- Une très bonne aptitude au service avec des déformations horizontales et verticales faibles, en adéquation avec les exigences du trafic ferroviaire
- Un bon comportement en torsion grâce à la rigidité apportée par les haubans
- Une stabilisation longitudinale naturelle du tablier grâce au système de haubanage et l'utilisation d'appuis pendulaires
- La dimension réduite des câbles principaux qui limite les effets aérodynamiques et les coûts
- Une méthode de construction optimisée par la simultanéité des activités.

Au final, un ouvrage achevé extrêmement élégant et d'une grande esthétique, dans le site unique au monde qu'est le Bosphore. Le cahier des charges des autorités est parfaitement rempli : respecter la philosophie et l'architecture des deux ponts existants. Cet ouvrage exceptionnel place une nouvelle fois les ponts suspendus turcs sur le devant de la scène internationale.

- Excellent horizontal and vertical service limit state with small deflections which ease the operational conditions of the railway
- Good torsional behavior due to the high transverse stiffness procured by the stiffening cables
- Natural longitudinal stabilization of the deck due to the cable system, improved by the use of pendular bearings
- Reduced size of the main cable, limiting aerodynamic effects
- Time saving erection procedure due to the simultaneity of erection zones.

Finally, an extremely elegant and aesthetically accomplished bridge has taken its place in that unique location in the world which is the Bosphorus. An accomplishment of the owner's initial wish: respecting the philosophy and the architecture of the two existing bridges. This outstanding structure once again places Turkish suspension bridges in the front line of international landmarks.

Auteurs/Authors

Jean-François Klein (†)
Dr ès techn., ing. civil dipl. EPFL
T engineering int'l SA
CH-1201 Genève

Michel Virlogeux
Consulting Engineer
Honorary President FIP and fib
Michel Virlogeux Consultant Sarl
F-78830 Bonnelles
virlogeuxconsultant@orange.fr

Thierry Delémont
Ing. civil dipl. EPFL
T engineering int'l SA
CH-1201 Genève
gva@t-engineering.com

Vincent de Ville de Goyet
Dr. Ing., ULG Prof.
Bureau Greisch
B-4031 Liège
vdeville@greisch.com

Le nouveau pont de la Sorge

The new bridge over the river Sorge

Aurelio Muttoni, Miguel Fernández Ruiz, Quentin Roubaty



Fig. 1

Vue aérienne du nouveau pont de la Sorge.

Aerial view of the new bridge over the Sorge.

Introduction

Le nouveau pont de la Sorge est un ouvrage en béton armé précontraint qui relie les communes de Chavannes-près-Renens et d'Écublens (VD). L'ouvrage, d'une longueur d'environ 120 m et d'une largeur de 12,0 m, présente une forme de Y en plan et doit offrir aux futurs habitants du quartier de La Pala une liaison sécurisée et de qualité au site des Hautes Écoles (EPFL et UNIL), en franchissant une rivière, une route ainsi qu'une voie du métro lausannois.

Contexte

Afin de répondre à une pénurie d'hébergements pour étudiants

Introduction

The new bridge over the river Sorge is a prestressed, reinforced concrete structure connecting the villages of Chavannes-près-Renens and Ecublens (VD, Switzerland). With a total length of about 120 m and a width of 12.0 m, it has a Y-shape in plan and it is to provide the future residents of the La Pala quarter with a safe and quality link to the site of the universities (EPFL and UNIL), crossing over the river Sorge, a road and a line of the Lausanne metro.

Context

In response to the lack of student housing capacity in the Lausanne region, the cantonal government

dans la région lausannoise, l'État de Vaud a organisé un concours pour de nouveaux logements destinés aux étudiants et hôtes académiques sur la parcelle de La Pala située à Chavannes-près-Renens (VD). Piloté par l'intermédiaire du Service Immeuble, Patrimoine et Logistique (SIPaL), ce concours intégrait également la réalisation d'un pont, dont l'objectif était de relier le quartier de La Pala au site des Hautes Écoles qui sont séparés par la rivière de la Sorge, la route de la Sorge ainsi que la voie du métro m1 des Transports Lausannois. Ce pont devait également assurer la continuité d'une route, dont l'ancienne configuration nécessitait



Fig. 2

Vue de la branche principale.

View of the main branch.

of Vaud organised a competition for new accommodation for students and academic guests based on the "La Pala" terrain at Chavannes-près-Renens (VD). Under the guidance of the Buildings, Heritage and Logistics Department (SIPaL), this competition also considered the requirement of building a bridge to safely connect the new student housing facilities at La Pala with the University site at Ecublens, which are separated by the Sorge river, the Sorge road and line m1 of the

le franchissement de la voie ferroviaire par le biais d'un passage-à-niveau. Dédié principalement à la mobilité douce (piétons et cyclistes), le nouveau pont de la Sorge doit ainsi également accueillir le trafic routier, limité aux poids lourds 40 t.

Conception

Pour répondre à ces exigences, l'ouvrage est constitué d'une branche principale et d'une branche secondaire (appelée « branche nord-est ») qui lui confèrent une

Transports Lausannois metro. This new bridge was also to ensure the continuity of an existing road, the configuration of which required a level crossing over the railway line and is primarily intended for light traffic (cycles and pedestrians). Nevertheless, the new structure should also be capable of supporting road traffic with heavy vehicles up to 40 t.

Conceptual design

In order to satisfy the various constraints of the project, the bridge

Maître d'ouvrage/Owner
Canton de Vaud – Service immeubles, patrimoine et logistique (SIPaL)
Ingénieur civil (projet et direction des travaux)/Civil engineer (project and site management)
Muttoni & Fernández Ingénieurs Conseils SA, Ecublens (VD)
Architecte/Architect
UAS ag, Zurich
Entreprise de construction/Contractor
Marti Construction SA, Lausanne

Réalisation/Realisation
2016–2017

Coûts/Costs
y compris honoraires et TVA/
including fees and VAT
env. 8 Mio CHF/about 8 million CHF



Fig. 3

Franchissement de la rivière de la Sorge et rainure centrale.
Crossing of the Sorge river and central groove.



Fig. 4
Pile à béquilles en V.
V-support pile.



Fig. 5
Jonction des branches principale et nord-est.
Junction of the main and north-east branches.

forme de Y en plan (Fig. 1): la branche principale du pont, dans le prolongement de la route de Praz-Véguey, permet la suppression du passage-à-niveau et est dédiée aux véhicules (chaussée de 5,0 m) ainsi qu'aux piétons et cyclistes (trottoirs de 4,0 m et de 1,5 m). La branche nord-est, quant à elle, dessert le nouveau bâtiment et est exclusivement dédiée à la mobilité douce (trottoir de 6,0 m) ainsi qu'aux véhicules d'urgence.

Le profil en long du pont est dicté par le gabarit vertical au droit de la voie du métro m1 et de la route de la Sorge ainsi que par la déclivité maximale autorisée pour les personnes à mobilité réduite (6%). Le gabarit sous l'ouvrage prévoit également l'éventuel dédoublement de la voie actuelle du métro ainsi que la création de deux voies supplémentaires sous la travée nord.

L'intégration de l'ouvrage dans le site est assurée par le choix d'un concept urbain dont les éléments porteurs sont proches de ceux d'un bâtiment (dalles et murs porteurs). L'ouvrage est conçu comme une structure unitaire avec une section constante sur toute sa longueur et les éléments d'appui (piles et culées) sont homogènes avec le tablier (Fig. 2 à 5). Le tablier du pont est une poutre

was developed with a main branch and a secondary one (called "north-east branch"), yielding its characteristic Y-shape (Fig. 1). The main branch, prolonging the Praz-Véguey road, replaces the level crossing and is intended for both traffic (two lanes, 5-m wide) and cycles and pedestrians (two pavements, 1.5 and 4-m wide). The secondary branch, on the other hand, is intended only for pedestrians and cycles (pavement 6-m wide), and for emergency vehicles.

The longitudinal profile of the bridge is governed by the minimum vertical clearance over the metro line and by the maximum slope allowed for people with reduced mobility (6%). The clearance under the bridge also allows for the possible future doubling of the current metro track as well as the installation of two additional lines beneath the north spans.

To integrate it in the site, the bridge follows an urban concept, with the basic structural elements being similar to those of buildings: slabs and columns. A unitary design is retained for the structure, with a constant section throughout its length, and the columns and abutments are homogeneous with the deck (Fig. 2 to 5).

continue en béton armé précontraint dont la section a été choisie pour assurer une transparence maximale et permettre de dissimuler toutes les conduites et les éléments techniques dans une rainure centrale peu visible. Les conduites transversales reliant les évaloirs au collecteur central sont disposées à l'intérieur de la section de sorte qu'aucune conduite n'est visible. Le caractère longiligne de l'ouvrage, souligné par la présence de cette rainure, est également renforcé par la présence des piles et des culées à l'axe de l'ouvrage.

Le choix des piles inclinées en V permet de réduire la portée maximale de l'ouvrage et ainsi garantir un élancement raisonnable du tablier. Les culées nord et sud ont la même inclinaison que les piles et sont évidées afin de limiter leur poids et la probabilité de tassement sur un sol compressible.

La section transversale de l'ouvrage est une dalle massive dont l'épaisseur augmente vers la partie centrale du tablier afin d'assurer une hauteur statique suffisante (Fig. 6). Cette dernière est limitée à environ 1,0 m par le gabarit à respecter sur la voie actuelle du m1 et par le niveau de la chaussée sur l'ouvrage. En plus de remplir leurs fonctions habituelles les bordures jouent le rôle de protec-

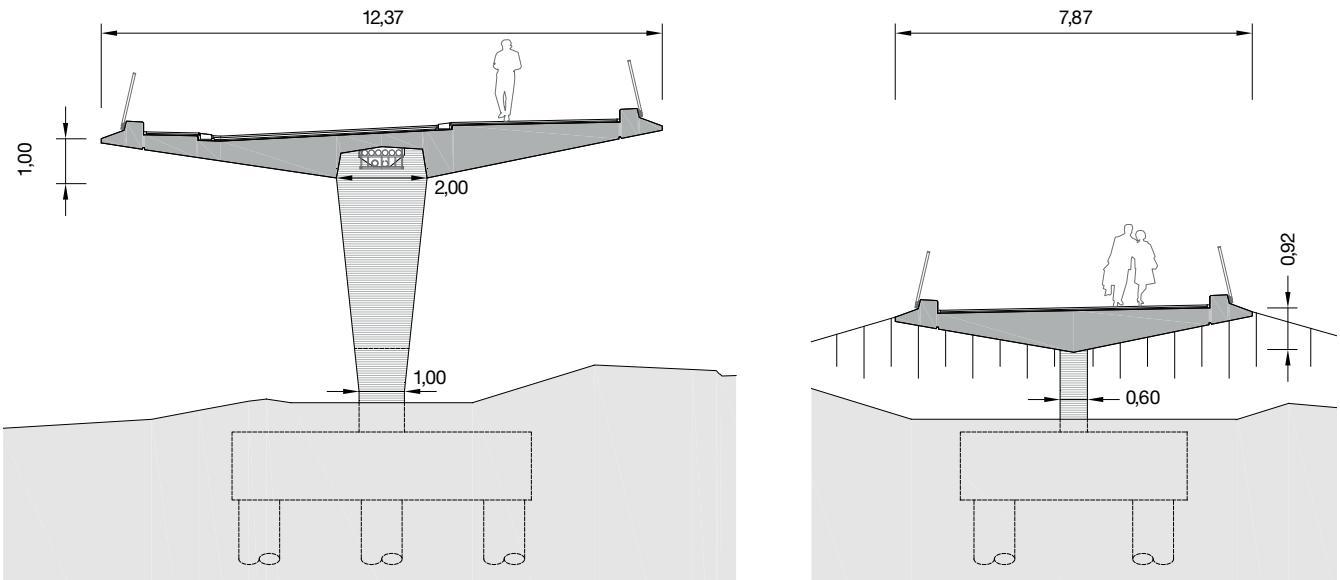


Fig. 6

Section transversale du tablier de la branche principale avec vue de la pile (à gauche) et de la branche nord-est avec vue de la culée (à droite).

Cross-section of the deck of the main branch with view of the pier (left) and north-east branch with view of the abutment (right).

The bridge deck is a continuous, prestressed concrete beam. The cross-section has been selected to ensure maximum transparency and to host and hide the various pipes and services in a central groove. The drainage elements connecting the deck drains to the central collector are concealed within the concrete section so that no pipes are visible. The predominantly longitudinal appearance of the structure is strengthened by the presence of the groove and the alignment of the piles and abutments long the axis of the structure.

The V-shaped piles were selected to reduce the span length of the bridge, so to keep the deck reasonably slender. The north and south abutments present the same inclination as the piers and are hollow in order to reduce their total weight and the possibility of settlement in compressible ground.

The cross-section is a solid slab with thickness increasing towards the central part of the deck to provide sufficient static height (Fig. 6). This height is nevertheless limited to 1.0 m in order to satisfy the requirements of the metro line. The borders at edges of the

tion des utilisateurs vis-à-vis de la ligne de contact du métro m1.

Système porteur

Le tablier est une poutre continue de cinq travées dont la portée maximale atteint 26,2 m (élancement $l/h = 26,2$) sur le métro et la route (Fig. 7).

Dans le sens longitudinal, la branche principale de l'ouvrage est munie de six câbles de précontrainte par adhérence de 19 torons ø15,7 mm (degré de protection contre la corrosion C) alors que la branche nord-est en comporte deux du même type. Transversalement, des câbles de précontrainte de 7 torons ø15,7 mm (degré de protection contre la corrosion B) sont disposés au droit de chaque entretoise. Enfin, les murs de la culée sud sont munis chacun de deux câbles de précontrainte de 7 torons ø15,7 mm.

Chaque pile est constituée de deux bêquilles de section variable qui reposent sur une base commune de 1,5 x 1,0 m. Une banquette de répartition transmet les charges provenant des piles et des culées aux fondations profondes de l'ouvrage. Les pieux foré-tubés, de type flottant, ont un diamètre de 0,90 et 1,30 m et une

cross-section also provide users with protection from the overhead conductor of the metro line.

Structural system

The deck slab is a continuous, 5-span beam with a maximum span of 26.2 m (slenderness $l/h = 26.2$) over the road and metro line (Fig. 7).

In the longitudinal direction, the main branch has 6 post-tensioning tendons of 19 strands, ø15.7 mm, (corrosion protection level C). The secondary branch has two tendons of the same type in the longitudinal direction. In the transverse direction, the tendons have 7 strands, ø15.7 mm, in line with each cross-strut (corrosion protection level B). The walls of the south abutment also have two tendons of 7 strands, ø15.7 mm. The piers are inclined supports with variable section, resting on a shared concrete plinth, 1.5 x 1.0 m. A load-spreading pile cap transmits the loads from the piers and abutments to the deep foundations of the structure. The case and drilled piles of the floating type have a diameter between 0.90 m and 1.3 m and a maximum length of 42 m. The total length of the bridge requires the use of

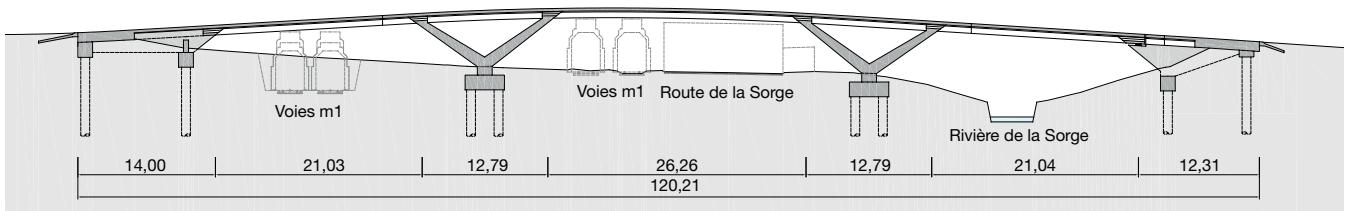


Fig. 7

Coupe longitudinale du pont.

Longitudinal section of the bridge.

longueur pouvant atteindre 42 m. La longueur de l'ouvrage nécessite l'utilisation d'appuis mécaniques et d'un joint de dilatation qui, pour réduire la maintenance et le bruit provoqué par le trafic, ne sont disposés qu'à la culée sud. Le reste de l'infrastructure (culées nord et piles) est liée monolithiquement au tablier de l'ouvrage. La stabilité du pont sous charges horizontales (séisme) est assurée par sa forme en Y, par sa courbure en plan, par le cadre rigide constitué par les deux piles nord ainsi que par le blocage transversal du tablier au droit de la culée sud.

Construction

La construction débuta en août 2016 et se termina en octobre 2017. Elle s'effectua selon un mode de construction conventionnel, avec l'emploi de cintres fixes et d'étaillages.

Après avoir réalisée les fondations profondes, les banquettes, les piles et les culées, le bétonnage du tablier fut réalisé en deux phases : bétonnage puis mise en précontrainte de la partie centrale du tablier (volume de bétonnage d'environ 440 m³) puis bétonnage et mise en précontrainte des trois extrémités. Un tiers des câbles de

mechanical bearings and an expansion joint at the south abutment. On the other side (north side), no mechanical bearings or expansion joint are used so as to minimise traffic noise and maintenance.

The safety against horizontal loads (earthquake) is ensured by the Y-shape and curvature of the bridge in plan and by the frame effect of the two north piers and by supports at the south end permitting no transverse movement.

Construction

The construction of the bridge started in August 2016 and was completed in October 2017. It was performed using conventional construction methods, with fixed support scaffolding and stays.

The deep foundations were cast first, followed by the plinths, columns and abutments. The deck slab was cast in two phases: first the central part was poured and post-tensioned (concrete volume of about 440 m³), then the three extremities were poured and prestressed. One third of the post-tensioning tendons of the main branch serve as continuity pre-stressing between the different casting sections.

précontrainte de la branche principale sert de précontrainte de continuité entre les différentes étapes de bétonnage.

Auteurs/Authors

Aurelio Muttoni
Prof. Dr ès Sciences, ing. dipl. ETHZ

Miguel Fernández Ruiz
Dr ès Sciences, ing. dipl. Université Polytechnique de Madrid

Quentin Roubaty
Ing. dipl. EPFL

Muttoni & Fernández
Ingénieurs Conseils SA
CH-1024 Écublens (VD)
info@mfic.ch

Die Taminabrücke bei Pfäfers

The Tamina Canyon crossing near Pfäfers

Volkhard Angelmaier

Einleitung

Das Taminatal bildet die südliche Spitze des Kantons St. Gallen. Es verläuft ungefähr von Süden nach Norden und mündet beim Kurort Bad Ragaz in das Tal des Alpenrheins. In seinem unteren Drittel fliesst die Tamina durch eine tief eingeschnittene Schlucht, die an den Talflanken liegenden Siedlungen voneinander trennt. Aufgrund der geologischen Risiken genügt die linksseitige Valenserstrasse auf weiten Teilen den heutigen und zukünftigen Anforderungen nicht mehr. Aus diesem Grund schrieb das Tiefbauamt Kanton St. Gallen im Jahr 2007 einen internationalen Projektwettbewerb für die Überbrückung des Taminatals aus.

Der Grundgedanke des letztlich ausgelobten Wettbewerbsentwurfs bestand in der stützenfreien Überspannung der Taminaschlucht mit einer Bogenkonstruktion und einer ebenfalls stützenfreien Überbrückung der

Introduction

The Tamina Canyon forms the southern edge of the Canton of St. Gallen in Switzerland. It leads approximately from South to North and into the Alpine Rhine Valley at the health resort Bad Ragaz. In its lower third, the Tamina River flows through a deep gorge that separates the towns on the flanks of the valley. Due to its geological hazards, the road on the left side near the village of Valens no longer meets today's or future requirements. For this reason, the civil engineering department (Tiefbauamt) of the Canton of St. Gallen announced an international project competition for the crossing of the Tamina Canyon.

The basic concept of the winning design proposed the construction of a column-free crossing over the Tamina Canyon with an arch and a column-free bridging of the side fields to the abutments with a rigid frame structure.

Seitenfelder bis zu den Widerlagern mit einer biegesteifen Rahmenkonstruktion.

Bauwerksentwurf und Einpassung in die Landschaft

Aus den Randbedingungen ergaben sich für das Entwurfskonzept folgende Prämissen

- Das Haupttragwerk wird unterhalb der Fahrbahn angeordnet.
- Die Taminaschlucht wird stützenfrei überspannt (Bogen mit ca. 260 m Spannweite).
- Die Endfelder in den Hangbereichen werden ebenfalls stützenfrei überspannt (biegesteife Rahmen mit 89 m Spannweite auf Seite Pfäfers und 48,5 m Spannweite auf Seite Valens).
- Die Herstellung der Hauptöffnung (Bogenbereich) erfolgt im Freivorbau mit Hilfsabspannungen.

Übergeordnetes Ziel des Entwurfs war es, ein Ingenieurbauwerk zu



Fig. 1
Ausgangssituation: Die Taminaschlucht, Blick aus Nordwesten.
Initial situation: the Tamina Canyon with view from the northwest.
(© Tiefbauamt Kanton St. Gallen)

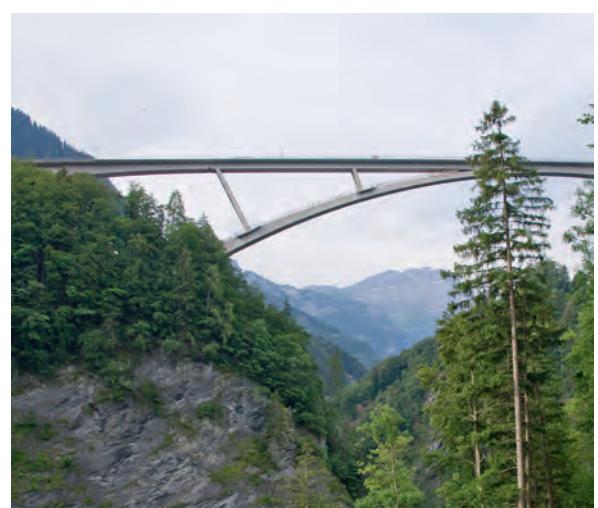


Fig. 2
Ansicht.
Side view.
(© Tiefbauamt Kanton St. Gallen)

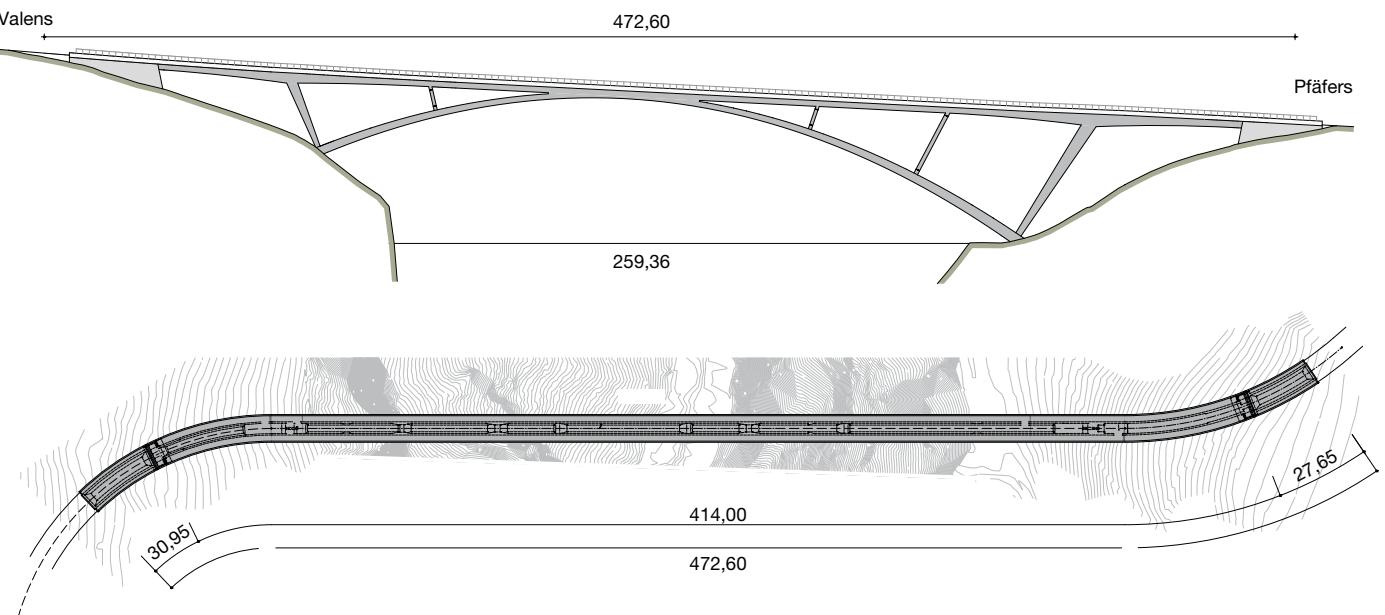


Fig. 3
Ansicht und Grundriss.
Side and plan views.

Landscape considerations and design

The following premises resulted from the parameters for the design concept

- The main bearing structure is beneath the roadway slab.
- The Tamina Canyon is crossed without intermediate columns (arch with a span of 260 m).
- The end spans in the slope areas are also spanned column-free (rigid frames with a span of 89 m on the Pfäfers side and 48.5 m on the Valens side).
- The main opening (arch area) is created as a free cantilever structure with temporary cable stays.

The overarching goal of the design was to create an engineering masterpiece that fits smoothly and precisely into the terrain and that at the same time creates a distinctive identity due to its appearance. In combination with the column-free spans of the lateral slope areas, the wide-spanned arch across the gorge leads a high degree of transparency.

The fusion of the arch with the superstructure in the crown area reinforces the impression of filigree, since only three additional arch stands are required between the impost areas, resulting in very

generous openings between the arch and the superstructure. The radial arrangement of the arch stand enhances the overall impression of harmony, not least because the inclinations of the stands at the imposts, which function as end frame shafts, take up the inclination of the valley flanks. The impression created is, therefore, that the bridge emerges as a matter of course, naturally and organically from the valley (Fig. 2).

Construction

The constructive implementation of the design's main aspect was realized consistently and in accordance with structural requirements, taking into account all concerns related to the construction process and assembly (Fig. 3). The arch is a reinforced concrete structure with a span of 260 m and is fixed to the ground. It has, therefore, the highest construction height of 4.00 m in the area of the imposts, which decreases to 2.20m towards the crown area. The width of the arch varies as well from 8.50 m (Valens side) to 9.00 m (Pfäfers side) to 5.00 m in the crown area. This provides an interesting and exciting haunch when viewed from below. Over

Konstruktive Umsetzung

Die konstruktive Umsetzung des Entwurfsgedankens erfolgte konsequent entsprechend den statisch-konstruktiven Erfordernissen unter Berücksichtigung der entsprechenden Belange aus dem Bauablauf und der Herstellung (Fig. 3).

Der Bogen ist als Stahlbetonkonstruktion mit einer Stützweite von ca. 260 m ausgeführt, die im Baugrund eingespannt ist und daher im Kämpferbereich mit 4,00 m die grösste Bauhöhe besitzt, die zum Scheitel hin auf 2,20 m abnimmt. Die Breite des Bogens ist ebenfalls veränderlich und verjüngt sich von 8,50 m (Seite Valens) bzw. 9,00 m (Seite Pfäfers) an den Kämpfern auf 5,00 m im Scheitelbereich. Es ergibt sich dadurch in der Untersicht eine interessante und spannungsreiche Taillierung. Über weite Bereiche kann der Bogen als Hohlkasten ausgebildet werden, zwischen den beiden letzten Aufständerungen und dem Scheitel liegt ein massiver Querschnitt vor.

Die Verbindung zwischen Überbau und Bogen erfolgt im Scheitelbereich monolithisch, zu den Kämpfern hin werden drei zusätzliche Bogenscheiben als Massivquerschnitte angeordnet. In der Ansicht sind diese Bogenscheiben bewusst schlank ausgeführt (sie wirken quasi als Pendelstäbe, Fig. 4) – im Querschnitt erhalten sie einen leichten Anzug zum Bogen hin.

Die Aufständerung im Bereich der Kämpfer unterscheidet sich grundsätzlich von den «Pendelschei-



Fig. 5

Freivorbau im Wochentakt.

Free cantilever construction on a weekly basis.

wide areas, the arch was designed as a hollow box; there is a solid cross-section between the two inner stands and the crown area. The connection between the superstructure and the arch is monolithic in the crown area; three additional arch discs as solid cross-sections are arranged towards the imposts. In this view, these arch discs are deliberately slim (they appear as pendulum rods), Figure 4, in the cross section, they become slightly tightened towards the arch.

The elevation in the impost area differs fundamentally from the pendulum rods. The pendulum rods provide the elevation of the superstructure and function as framework legs as part of the end-framework in the side spans. From an economic and aestheti-

ben». Ihnen kommt neben der Aufständerung des Überbaus in erster Linie auch die Funktion eines Rahmenstiels als Teil der Endfeldrahmen in den Seitenfeldern zu.

Erst durch diese biegesteife Rahmenkonstruktion (Überbau als Rahmenriegel, Aufständerung als Rahmenstiel) ist die stützenfreie Überbrückung der Seitenfelder (89,00 m Seite Pfäfers; 48,50 m Seite Valens) wirtschaftlich und gestalterisch ansprechend realisierbar. In der Ansicht erhalten die als Hohlkastenquerschnitte ausgeführten Rahmenstile einen deutlichen Anzug zum Kämpfer hin, während die Bauhöhe zum Überbau hin aus der Rahmenwirkung merklich zunimmt. Ihre Funktion innerhalb des (Rahmen-) Tragwerks wird klar ablesbar, vor



Fig. 4

Betongelenk.
Concrete hinge.

Technical data	
Construction period	2013–2016
Costs	CHF 36.7 million
Total length incl. abutments	475 m
Roadway width	9.50 m
Span	260 m
Height above valley	200 m
In-situ concrete	14,000 m ³
Reinforcement	3,500 t
Pretensioning	245 t
Cables	190 t
Excavation	25,000 m ³
Bridge sealing	4,700 m ²

Technische Daten	
Bauzeit	2013–2016
Baukosten	CHF 36,7 Mio.
Länge einschl. Widerlager	475 m
Fahrbahnbreite	9,50 m
Bogenspannweite	260 m
Höhe über Tal	200 m
Ortbeton	14 000 m ³
Bewehrung	3500 t
Vorspannung	245 t
Halte-/Rückhaltekabel	190 t
Aushub	25 000 m ³
Brückenabdichtung	4700 m ²

cally pleasing design point of view, the side fields (83.00 m at the Pfäfers side and 48.00 m at the Valens side) can only be bridged column-free with such a rigid frame structure (superstructure as framework beam, elevation as framework leg). In the side view the box girder section, realized as a framework leg, receives a visible haunching towards the imposts, while the construction height towards the superstructure increases significantly due to the framework behaviour. Their function within the (frame) structure is clearly visible, especially in the distinction compared to the pendulum-like remaining arch discs.

The superstructure is a continuous prestressed concrete beam. Due to its monolithic connection with the arch and because of the arrangement of the elevations, the spans are between 38.45 m and 62.70 m. The box girder cross section has a consistent construction height of 2.75 m across wide parts of the bridge. In the area of the end fields, the box girder cross-section increases to an average of 4.75 m to 5.00 m (on the



Fig. 6
Bogenschluss.
Completion of the arch.
(© Tiefbauamt Kanton St. Gallen)

allem auch in der Unterscheidung zu den pendelartig ausgeführten restlichen Bogenscheiben.

Der Überbau ist als Spannbeton-Durchlaufträger ausgeführt. Die Stützweiten messen wegen der monolithischen Verbindung mit dem Bogen und infolge der Anordnung der Aufständerungen zwischen 38,45 m und 62,70 m. Der Hohlkastenquerschnitt wird über weite Bereiche konstant mit einer Bauhöhe von 2,75 m ausgeführt. Im Bereich der Endfelder erhält er entsprechend seiner Funktion als Rahmenriegel eine Voute und nimmt auf 4,75 m bzw. 5,00 m (Seite Pfäfers) und 4,30 m bzw. 4,50 m (Seite Valens) zu. Mit der Wahl der Breite des Hohlkastens von 5,00 m ergeben sich Kragarmlängen (inklusive Brüstung) von 2,73 m. Es liegt somit ein ausgewogener Querschnitt vor – eine Quervorspannung ist nicht erforderlich.

Durch die monolithische Verbindung der Aufständerungen mit Bogen und Überbau werden Lager nur an den Widerlagern erforderlich, an denen zum Ausgleich der Längenänderungen auch Fahrbahnübergänge an beiden Talseiten angeordnet werden.

Sämtliche Tragwerksteile sind in Stahlbeton oder Spannbeton (Überbau) ausgeführt. Mit dieser Materialwahl ist eine konsequente Umsetzung des Gesamtkonzepts

Pfäfers side) and 4.30 m or 4.50 m (on the Valens side), in line with its function as a frame beam.

Choosing a width of 5.00 m for the box girder results in a cantilever length of 2.73 m (incl. balustrade). This provides for a balanced cross-section and no transverse prestressing is required. Given the monolithic connection of the stands with the arch and the superstructure, bearings are only required for the abutments, where road transitions are also arranged on both sides of the valley to compensate for the changes in length. All supporting structure elements are reinforced or prestressed concrete structures (superstructure). The use of this material allows for the consistent, coherent and above all economic implementation of the overall concept in a structurally sensible supporting structure.

Erection and construction method

The core idea for the construction of the bridge consisted of a free cantilever structure with back-spanning of the arch. The framework construction of the side fields are falseworks, as with the superstructure, which was erected on an arch-based scaffolding. The steep valley flanks and some areas of the Tamina River, therefore, remain completely untouched.

Bauherr/Owner
Tiefbauamt Kanton St. Gallen
Projektverfasser/Project author
Leonhardt, Andrä und Partner
Beratende Ingenieure VBI AG,
D-Stuttgart
Planungspartner/
Planning consultants
dsp Ingenieure & Planer AG,
CH-Greifensee
Smolczky & Partner GmbH,
D-Stuttgart
Prüfingenieure/Checking engineers
Prof. Thomas Vogel, ETH Zürich,
Zürich
Pascal Klein, dipl. Ing. ETH/SIA/USIC,
Zürich
Baugrundgutachter/
Geotechnical engineers
Dr. von Moos AG, Zürich
Bauleitung/
Construction management
Leonhardt, Andrä u. Partner
Beratende Ingenieure VBI AG,
D-Stuttgart
dsp Ingenieure & Planer AG,
CH-Greifensee
Bauausführung/Construction
ARGE Taminabrücke (STRABAG AG,
J. Erni AG, Meisterbau AG)
Planung Lehrgerüste/
Planning falseworks
LGB – Lehrgerüst GmbH, D-Meiningen

in ein konstruktiv sinnvolles Tragwerk schlüssig und vor allem auch wirtschaftlich möglich.

Herstellung und Bauausführung

Der Kerngedanke der Herstellung der Brücke besteht aus einem Freivorbau mit Rückverhängung des Bogens. Die Rahmenkonstruktionen der Seitenfelder werden ebenso wie der Überbau auf einem Lehrgerüst hergestellt, das mithilfe eines bogengestützten Gerüsts errichtet wird.

Die steilen Talflanken und die Bereiche der Tamina selbst bleiben somit vollständig unberührt, und ein Höchstmaß an Rücksichtnahme auf die sensiblen Schongebiete ist sichergestellt.

Herstellung Kämpfer

Der Baubeginn erfolgte jeweils bei den beiden Kämpfern und den Widerlagern. Die Kämpfer wurden auf dem in einer Tiefe von ca. 6 m anstehenden Fels gegründet. Um die Zwangsspannungen bei den Massenbetonen der Kämpfer zu begrenzen, wurde die Temperaturdifferenz infolge der Hydratationswärme des Betons zwischen Kern und Oberfläche in der Ausschreibung auf 30 °C und die maximale Betontemperatur auf 60 °C festgelegt. Dazu wurden entsprechende Betonrezepturen mit einem Hochofenzement CEM III/B 32,5 entwickelt. Die bei der

This ensures the highest degree of protection for ecological sanctuaries.

Construction of the imposts

Construction began with work on the two imposts and the abutments. The imposts were founded on a 6 m deep rock. In order to limit restraining stresses at the bulk concrete of the imposts, the tender documents limited the temperature difference due to the hydration heat of the concrete to 30 °C between core and surface. The maximum soil temperature was to be no more than 60 °C. For this purpose, concrete recipes with a blast furnace cement CEM III/B 32.5 were developed. The values measured over two weeks with temperature sensors were within a temperature difference of 26 °C and a maximum core temperature of 58 °C and, therefore, within acceptable limits.

Construction of the arch

The arch was erected in a cantilever construction with temporary stay cables. The necessary auxiliary pylons made of steel and with a height of 107 m on the Pfäfers side and a height of 78 m on the Valens side were installed on the side of the imposts' foundations by using a spherical bearing. The retention cables consisted of 7 to 24 single strands, coated with white polyethylene, which have a

Ausführung über zwei Wochen mit Temperaturfühlern gemessene Werte lagen dann auch bei einer Temperaturdifferenz von 26 °C und einer maximalen Kerntemperatur von 58 °C und somit im grünen Bereich.

Herstellung Bogen

Die Herstellung des Bogens erfolgte im Freivorbau mit einer temporären Abspannung. Die hierfür erforderlichen Hilfspylone aus Stahl mit einer Höhe von 107 m auf der Seite Pfäfers und 78 m auf der Seite Valens wurden seitlich auf den Kämpferfundamenten aufgestellt und durch ein Kalottenlager darauf gelenkig gelagert. Die Halte- und Rückhaltekabel bestanden aus 7 bis 24 weissen PE-ummantelten Monolitzen der Stahlgüte St 1680/1860 mit einer Querschnittsfläche von 150 mm² und einer Zugfestigkeit von 1860 N/mm².

Die Herstellung der einzelnen Bogenelemente erfolgte von der Seite Valens und Pfäfers nach einer gewissen Einarbeitungszeit parallel im Wochentakt (Fig. 5). Der Bogenschluss erfolgte mit einem Bogenelement mit 3 m Länge und wurde mit der Freivorbauschalung der Seite Pfäfers nach dem Abbau der Freivorbauschalung auf der Seite Valens hergestellt. Durch die laufende messtechnische Überwachung der Bogenherstellung betrug die Hö-



Fig. 7
Überbau auf Lehrgerüst.
Superstructure on falseworks.
(© Tiefbauamt Kanton St. Gallen)



Fig. 8
Herstellung des Überbaus parallel zu Bogenständern.
Construction of the superstructure, parallel to arch stands.
(© Tiefbauamt Kanton St. Gallen)



Fig. 9

Die fertige Brücke.
The completed bridge.
(© Bastian Kratzke)

steel grade of St 1680/1860 with a cross-section of 150 mm² and a tensile strength of 1860 N/mm². At first, the single arch elements were constructed only on the Valens side and after a certain period of time on the Pfäfers side as well, in parallel and on a weekly basis (Fig. 5).

The arch was completed with a 3 m long bridge element and constructed with the cantilever scaffolding on the side of Pfäfers, after having removed the cantilever scaffolding on the Valens side. Due to the ongoing metrological monitoring of the arch erection, the height deviation at the closure segment was only 2.5 cm. This difference was compensated for by slightly loosening the retention cables on the last transverse beam level of the pylon on the Pfäfers side (Fig. 6).

Constructing the superstructure
The superstructure in the arch area was created section by section using a scaffolding, supported by the arch. First of all, the 50 m long

henabweichung bei der Schlusslücke nur 2,5 cm. Diese Differenz wurde durch ein geringes Entspannen der Rückhaltekabel auf der letzten Querträgerebene des Pylons auf der Seite Pfäfers ausgeglichen (Fig. 6).

Herstellung Überbau

Der Überbau im Bogenbereich wurde abschnittsweise mit einem auf dem Bogen abgestützten Traggerüst erstellt. Dabei wurde zuerst der 50 m lange Bauabschnitt im Bereich des Bogenscheitels hergestellt und anschliessend der Überbau in jeweils 20 bis 30 m langen vier weiteren Bauabschnitten nach beiden Seiten bis zum Anschluss an die Vorlandtragwerke betoniert (Fig. 7).

Bogenständer mit Beton-gelenken

Parallel zur Erstellung des Überbaus erfolgte jene der massiven radialen Bogenständer mit einer Kletterschalung, Figur 8.

section of the arch crown was built and the superstructure was subsequently concreted to the foreland supporting structure, in 20 to 30 m long sections, divided into 4 construction phases (Fig. 7).

Arch stands with concrete hinges

The solid radial arch stands were erected parallel to the construction of the superstructure using a climbing formwork (Fig. 8).

Autor/Author

Volkhard Angelmaier

Dipl.-Ing.

Leonhardt, Andrä und Partner

Beratende Ingenieure VBI AG

D-70469 Stuttgart

stuttgart@lap-consult.com

Le tunnel RC6 et le pont sud sur la Birse à la frontière jurassienne

The RC6 tunnel and the south bridge over the Birse at the border between the cantons of Jura and Bern

Thierry Beuchat, Sylvain Plumey

Introduction

Le projet du tunnel de la route cantonale 6 – la RC6, ainsi que des ponts nord et sud sur la Birse – s'inscrit dans le cadre de la réalisation de la section 8 de l'A16 et plus particulièrement de la demi-jonction de Choindez. Le concept de celle-ci prévoyait effectivement la correction de la RC6 menant à Moutier, dont le coût avoisine les 20 millions, pour diverses raisons: Le déplacement de la route en rive gauche de la Birse permet d'étendre son confluent avec le ruisseau de Rebeuvelier et, en libérant le passage, de favoriser les échanges faunistiques, le site de la Verrerie se trouvant sur un corridor d'importance nationale. Les mesures prises se révèlent ainsi très favorables pour les milieux naturels et «compensent», du moins partiellement, les atteintes portées au secteur par l'implantation d'une demi-jonction.

Introduction

The project of the tunnel to carry the cantonal road 6, RC6, and the north and south bridges over the Birse form a part of the completion of section 8 of the A16 motorway and, more particularly, of the Choindez interchange. The concept of the latter included the straightening of the RC6 leading to Moutier, of which the cost is some 20 million, for various reasons: Moving the road to the left bank of the Birse permits the extension of its confluence with the Rebeuvelier and, by freeing the passage of the defile, favours the exchange of fauna, the la Verrerie site being located on a corridor of national importance. The measures taken thus prove to be very favourable for the natural environment and, at least partially, "compensate" the damage caused to the sector by the construction of an interchange.

Parallèlement, la correction de la géométrie routière, et notamment la suppression du virage très serré au pied de la Roche St-Jean, permet d'améliorer sensiblement les conditions de sécurité.

Pour concrétiser ce basculement en rive gauche, ce nouveau tronçon de RC6 prend naissance dans le giratoire de la Verrerie, franchit la rivière par le pont nord sur la Birse, traverse l'anticlinal dit d'Envelier et rejoint la frontière cantonale au pied de la Roche St-Jean en enjambant une deuxième fois le cours d'eau grâce au pont sud (Fig. 1). Outre les usagers motorisés, les piétons et les deux-roues légers sont autorisés à emprunter l'ouvrage souterrain.

Géologie

Les falaises sub-verticales de la Roche St-Jean constituent un exemple remarquable d'une sortie de cluse, soit celle de Roches, sous la forme d'un défilé. «Et au milieu coule une rivière»... La Birse traverse en effet le site et l'a modelé jusqu'à lui donner l'image fascinante qu'on lui connaît.

Le tunnel traverse au nord des éboulis, puis le Calcaire du Kimmeridgien et l'Oolithe de Ste-Vérène ainsi que les Calcaires algaires de Hautes Roches, pour déboucher dans la falaise abrupte sud que contourne la Birse.

La stratification très redressée a donné naissance à une série de falaises de 5 à 20 m de hauteur qui culminent à quelque 70 m en amont du portail nord. Le versant du portail sud est quant à lui constitué d'une falaise plus massive qui s'élève jusqu'à 80 m.

Les têtes des escarpements fracturées et altérées peuvent être à l'origine de chutes de pierres ou de blocs, raison pour laquelle des

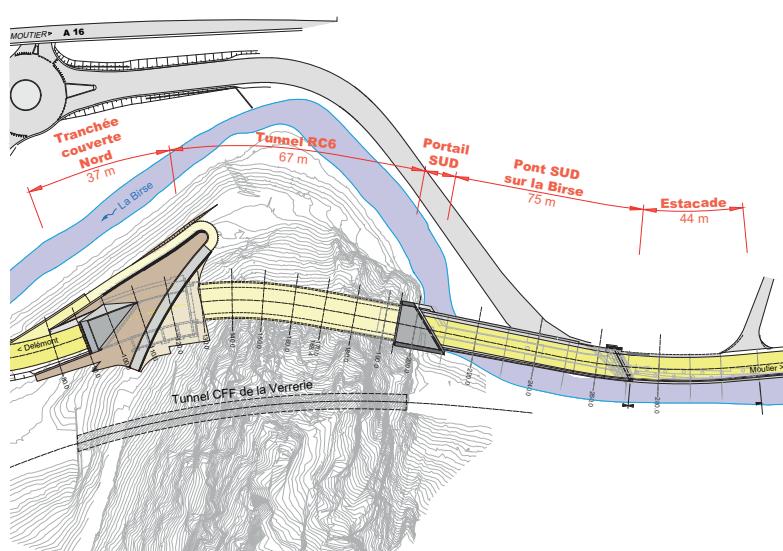


Fig. 1

Situation générale et localisation des parties d'ouvrage.
General situation and location of the parts of the construction works.

In parallel, the correction of the line of the road and, in particular, the elimination of the very tight bend at the foot of the Roche St-Jean, permits a notable improvement in road safety.

To realise this switch to the left bank, this new section of the RC6 starts from the la Verrerie roundabout, crosses the river on the north bridge over the Birse, crosses under the anticline of Envelier and reaches the cantonal border at the foot of the Roche St-Jean by crossing the watercourse for a second time via the south bridge (Fig. 1). In addition to motor traffic, pedestrians and cyclists are authorised to use the tunnel.

Geology

The near-vertical cliffs of the Roche St-Jean are a remarkable example of a gorge exit, in this case from the defile of the Roches gorge. "And in the middle flows a river"... Indeed, the Birse flows through the site and has shaped it to the fascinating form that we know.

To the north, the tunnel crosses scree and then Kimmeridge limestone and Ste-Vérène oolite, as well as the Hautes Roches algal limestones, to emerge in the abrupt south cliff skirted by the Birse.

The very steeply pitched stratification has given rise to a series of cliffs 5 to 20 m high, culminating some 70 m above the north portal of the tunnel. The south portal to

mesures de protection (purges, filets, clouages, surveillance de certains aléas, etc) ont été prises préalablement à la construction du tunnel, ceci en vue d'assurer la sécurité requise en phase chantier déjà. En outre, le portail sud présente un mur ouest qui accompagne le pont sur une quinzaine de mètres, en le protégeant latéralement.

Fouille et tranchée couverte nord

Le front d'attaque a été fixé en tenant compte d'une couverture minimale de quelque 4 m au-dessus de la naissance de la voûte est du tunnel.

La fouille s'étendait sur quelque 40 m pour une hauteur maximale de plus de 30 m et permit la construction des éléments du portail nord, à savoir un ouvrage d'entrée et une tranchée couverte trapézoïdale. La zone est traversée obliquement par le chemin de traîne qui dessert les massifs boisés en direction de La Combe et la topographie préexistante a été rétablie dans la mesure du possible lors du remblayage final (Fig. 2). Compte tenu de son implantation par rapport au versant, la tranchée couverte est soumise à des sollicitations fortement asymétriques, avec une forte poussée exercée à l'état final par le massif, et très variables malgré sa longueur réduite. Le concept structural de l'ouvrage répond à cette exigence par différentes mesures (Fig. 3).

the tunnel is in a more massive cliff that rises to 80 m.

The fractured and altered crests of the escarpments can be the source of rock falls, for which reason protective measures (clearances, nets, bolting, monitoring of certain uncertainties, etc.) were taken prior to the construction of the tunnel with a view to ensuring the required safety before starting work. Furthermore, the south portal has a west wall that extends beside the bridge for some fifteen metres to provide lateral protection.

North cut and cover

The cutting face was fixed, taking account of a minimum cover of some 4 m above the start of the east wall of the tunnel.

The excavation extended some 40 m with a maximum height of over 30 m and allowed the construction of the elements making up the north portal, namely an portal structure and a trapezoidal covered trench. Crossing the zone obliquely is the sledge track that serves the wooded heights in the direction of La Combe and the pre-existing topography was re-established so far as possible during the final backfill (Fig. 2). Given its position relative to the flank of the ridge, the cut and cover section is subject to highly asymmetrical stresses, with, in the final state, a strong thrust from the solid rock, and these vary greatly despite its short length.



Fig. 2

Vue de l'ouvrage d'entrée nord.
View of the north portal.

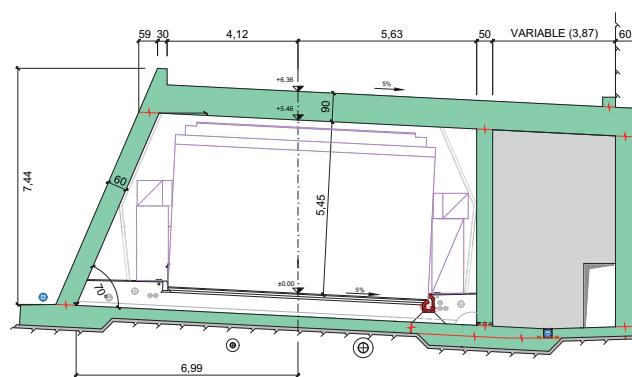


Fig. 3

Coupe transversale de la tranchée couverte nord.
Cross-section of the north cut and cover.

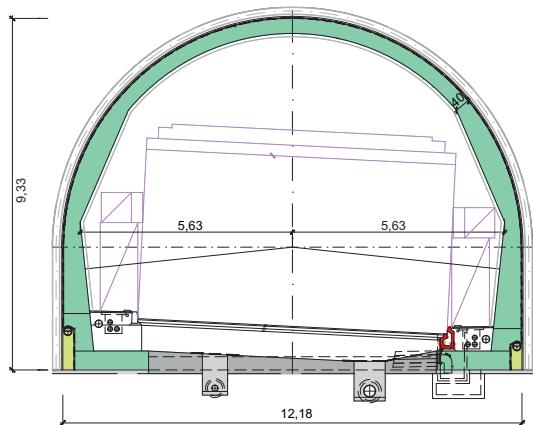


Fig. 4
Section transversale du tunnel.
Cross-section of the tunnel.



Fig. 5
Vue du tunnel en construction.
View of the tunnel under construction.

Le piédroit aval présente ainsi une inclinaison significative afin d'améliorer la reprise des sollicitations transversales. La prolongation de la dalle supérieure sur un vide sanitaire, implanté à l'amont du tube routier, et la réalisation de voiles transversaux engravés dans le massif rocheux améliorent également le comportement structural transversal de l'ouvrage. Par rapport à un concept traditionnel de cadre à deux montants, la structure imaginée conduit à une réduction importante des sollicitations dans la dalle et évite le développement de moments positifs dans l'angle de cadre amont, difficiles à maîtriser constructivement. Une liaison continue avec le revêtement armé du tunnel et la prolongation de la dalle de la tran-

The structural design meets these demands through various measures (Fig. 3).

The side wall on the downhill side is significantly inclined to better support the transverse forces. The extension of the roof slab over a void behind the wall on the uphill side of the road and the creation of cross braces anchored in the solid rock also improve the transverse structural behaviour of the structure. Relative to a traditional design with two uprights, the structure used here leads to a major reduction in the stresses in the roof slab and avoids the development of positive moments in the frame angle on the uphill side, which are difficult to control structurally.

A continuous link with the reinforced lining of the tunnel and

chéee couverte en souterrain permettent d'activer le cas échéant le tunnel en cas de déplacement de la tranchée couverte.

Le radier assure la transmission des efforts horizontaux directement au rocher calcaire situé à l'amont et ce principe soulage ainsi les efforts sur les fondations du montant aval réalisées à proximité du talus de la Birse.

Le concept proposé augmente ainsi la robustesse globale de l'ouvrage et permet de couvrir les aléas usuels aux structures en interaction avec le sol ou le rocher.

Tunnel RC6

Le tunnel présente un profil type probablement unique, du moins en Suisse: si la partie supérieure demeure circulaire comme à l'accoutumée, les zones latérales sont

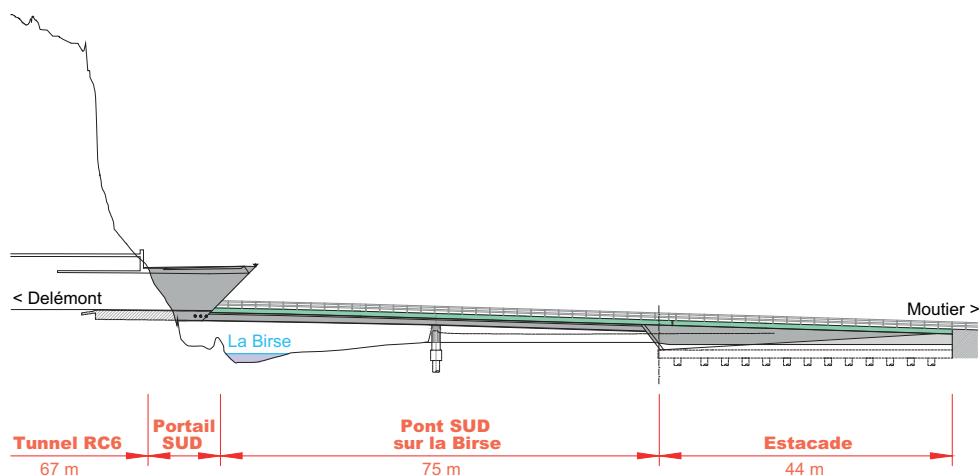


Fig. 6
Élevation du pont sud sur la Birse, du portail et de l'estacade.
Longitudinal section of the south bridge over the Birse, of the portal and the dam.

the underground prolongation of the slab of the covered trench enable the tunnel to be activated, if need be, in the event of movement of the cut and cover.

The ground slab transmits horizontal forces directly to the limestone rock on the uphill side, thus relieving forces on the foundations of the wall on the downhill side, which are close to the bank of the Birse.

The proposed design thus makes the overall structure more robust and covers the uncertainties that usually affect structures in interaction with the ground or the rock.

RC6 tunnel

The tunnel has a profile of a type that is probably unique, at least in Switzerland: while the upper part is a circular arc, as is usual, the sides are straightened, each formed of two planes in chevron (Figs. 4 and 5). This static load "extravagance" arises from architectural considerations. By this means, a continuity, a unity, even, is created between the north and south entries on the one hand and the tunnel on the other. The short length of the tunnel excavation, at just 67 m, permitted the implementation of this unusual design.

South portal and bridge over the Birse

The south bridge over the Birse consists of two asymmetrical

linearized and form each a chevron plan (Fig. 4 and 5). This "extravagance" static decoule de considerations architecturales. En effet, ce principe permet de créer une continuité, une unité, entre d'une part les portails sud et nord et le tunnel, d'autre part. C'est la faible longueur du tunnel creusé, soit 67 m, qui a permis la mise en œuvre de ce concept peu banal.

Pont et portail sud sur la Birse

Le pont sud sur la Birse est constitué de deux travées asymétriques de 49 et 29 m, l'unique pile centrale prenant place dans la zone de l'ancien mur soutenant la route cantonale construite autrefois en rive droite. La démolition de cette dernière a permis de recréer un véritable lit majeur, celui qu'occupait la rivière avant l'arrivée de l'homme.

La préservation des qualités paysagères du site imposait une intégration discrète du pont au pied des éperons rocheux; l'ouvrage reste humble face aux majestueux escarpements. En particulier aucune structure porteuse ne s'étend au-dessus de la surface de roulement et ses formes restent sobres. Le tablier présente une épaisseur réduite au maximum, variable de 1,4 à 1,2 m, ce qui conduit à un important élancement et participe donc à l'esthétique du pont. Afin de maintenir cette impression d'élancement, ce dernier s'en-

Maitre d'ouvrage/Owner
Service des Infrastructures,
République et Canton du Jura
Ingénieurs civils/Civil engineer
Buchs & Plumey SA, Porrentruy,
GVH SS, Delémont
Architecte/Architect
La Transjurane, Delémont
Entreprise de construction/Contractor
Consortium CTRC6: Infra Tunnel SA,
Bieri & Grisoni SA et F. Häni SA

spans of 49 and 29 m, with the single central pillar placed in the area of the old supporting wall of the cantonal road originally built on the right bank. The demolition of the latter has permitted the recreation of a true flood plane, as was occupied by the river before the arrival of man.

The preservation of the landscape qualities of the site imposed a discrete integration of the bridge and the foot of the rock spurs; the structure remains humble relative to the majestic escarpments. In particular, no load-bearing structure extends above the road surface and its outlines remain sober. The thickness of the bridge deck is reduced to a minimum, varying between 1.4 and 1.2 m, this makes it particularly slender and contributes to the aesthetic appearance of the bridge. To maintain this impression of slenderness, the bridge is "engulfed", even encased, in the tunnel portal, which protrudes in overhang above the river (Fig. 6).

Consisting of a solid slab and two cantilevers (Fig. 7), it is prestressed both transversally and longitudinally. It was built in two longitudinal stages, requiring the use of falsework over the bridge deck to support the main span while limiting the risks of log jam arising from the potential flooding of the Birse (Fig. 8).

The east flank of the bridge is up against the Roche St-Jean, which remains free of any excavation. While the south abutment is an integral part of the projecting wall built on the south bank, which closes with the rock at this point, the north end of the bridge is set back to the point of disappearing into the RC6 tunnel. The geometry of the tunnel por-

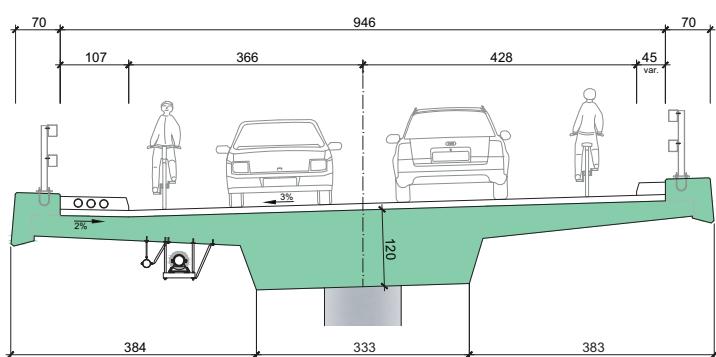


Fig. 7

Section transversale du tablier.
Cross-section of the bridge deck.

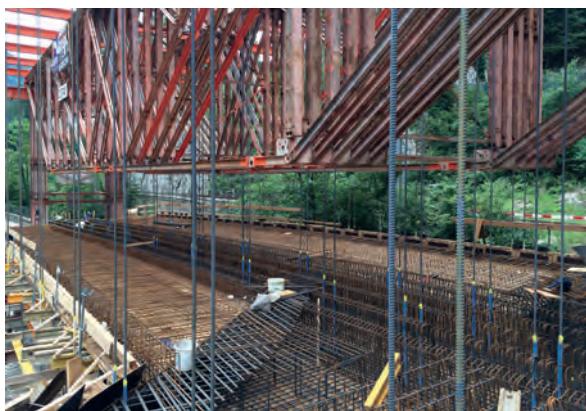


Fig. 8
Engagement des cintres par-dessus le tablier.
Use of falsework over the bridge deck.



Fig. 9
Vue du portail et du tunnel.
View of the tunnel and its portal.

gouffre, s'encastre même, dans le portail qui s'avance en surplomb au-dessus de la rivière (Fig. 6). Constitué d'une dalle massive et de deux porte-à-faux (Fig. 7), il est précontraint transversalement et longitudinalement. Sa réalisation en deux étapes longitudinales a nécessité l'engagement de cintres disposés par-dessus le tablier pour franchir la portée principale tout en limitant les risques d'embâcle liés aux crues potentielles de la Birse (Fig. 8).

Le flanc est du pont est accolé à la Roche St-Jean qui demeure quant à elle préservée d'une excavation. Alors que la culée sud fait partie intégrante du mur en estacade construit en rive droite et dont elle constitue la fermeture contre le rocher, l'extrémité nord du pont est en retrait jusqu'à disparaître dans le tunnel RC6.

La géométrie du portail découle de considérations architecturales et de la nécessité de protéger l'axe routier du risque de chutes de pierres depuis la falaise. Sa longueur a aussi été réduite au maximum de manière à minimiser l'impact des travaux sur la falaise à préserver.

Les parements intérieurs des murs réalisés en facettes permettent d'assurer une transition harmonieuse entre l'extrémité du portail et le revêtement du tunnel dont les zones latérales ont été adaptées selon le principe décrit plus haut (Fig. 9).

Le portail joue un rôle statique prépondérant pour le pont qu'il

tal arises from architectural considerations and the necessity of protecting the roadway from the risk of stone-fall from the cliff. Its length has been reduced to a minimum so as to minimise the impact of the work on the cliff to be preserved.

The faceted interior facings of the walls provide for a harmonious transition between the extremity of the tunnel portal and the lining of the tunnel, the side walls of which have been adapted according to the principle described above (Fig. 9).

The tunnel portal plays a dominant static role for the bridge, which it supports in cantilever above the Birse (Fig. 10). The loads arising from this are transmitted by transverse pretressing consisting of three cables of nineteen 0.6" strands in the walls of the portal and founded on the rock. The overall equilibrium of the tunnel portal is ensured by a monolithic bond with the lining of the tunnel, embedded in the solid rock, and by the underground extension of the roof slab of the portal over a length of 12.5 m.

In order to permit the removal of bridge deck supports during execution and before completion of the south portal, which supports it, active vertical anchor ties were installed in line with the south work face to provisionally embed the bridge deck, limit stresses and control deformations during the work phase.

soutient en porte-à-faux au-dessus de la Birse (Fig. 10). Les charges provenant de celui-ci sont transmises grâce à une précontrainte transversale composée de trois câbles de 19 torons 0,6" aux murs du portail puis sur le rocher. L'équilibre global du portail est assuré par la réalisation d'une liaison monolithique avec le revêtement du tunnel encastré dans le massif rocheux et par la prolongation de la dalle du portail en souterrain sur une longueur de 12,5 m. Afin de permettre, en cours d'exécution, le déclinage du tablier avant la réalisation du portail sud qui le soutient, des tirants d'ancre actifs verticaux ont été réalisés au droit du front d'attaque sud pour encastrer de manière provisoire le tablier, limiter les sollicitations et maîtriser les déformations en phase de chantier.

Difficultés en cours de chantier

Les méthodes de réalisation des différents ouvrages ont été fortement influencées par la forte exiguïté du site, ainsi que par la présence du cours d'eau, de la RC6 existante, d'une voie ferroviaire, de la demi-jonction autoroutière A16 et d'une ligne électrique à haute tension.

Une voie ferroviaire existante se situe à l'ouest du tunnel routier et une distance de quelque 25 à 35 m sépare les deux axes, soit jusqu'à moins de 17 m entre les piédroits des deux ouvrages souterrains. Elle traverse le tunnel dit



Fig. 10

Vue du portail et du tablier.

View of the tunnel portal and the bridge deck.

Difficulties during work

The methods employed to create the various structures were greatly influenced by the very cramped nature of the site, as well as by the presence of the water course, the existing RC6, a railway line, the A16 motorway interchange and a high-voltage electricity line.

An existing railway line is located to the west of the road tunnel, with a distance of some 25 to 35 m between the two axes, making a minimum distance of less than 17 m between the side walls of the two underground structures. It passes through the so-called "Verrerie de Roches" tunnel, a structure that came into service in 1877 and required increased monitoring during the work.

During the work, the monitoring was also extended to include the behaviour of the surrounding rock during the excavation of the cut and cover and of the tunnel itself. The monitoring included as well keeping track of the potentially unstable blocks above the site.

The traffic on the RC6, kept flowing on the old road until completion of the first phase of the bridge and was then diverted

«de la Verrerie de Roches», ouvrage mis en service en 1877 et a nécessité une surveillance accrue lors des travaux.

En cours de travaux, la surveillance a également été élargie afin d'intégrer le suivi du comportement du massif rocheux pendant les travaux de fouille et d'excavation du tunnel. La surveillance a également inclus le suivi particulier de blocs potentiellement instables au-dessus du chantier. Le trafic de la RC6, maintenu sur l'ancienne route jusqu'à la fin de la réalisation de la première étape du pont, a ensuite dû être dévié dans le tunnel autoroutier de la Roche St-Jean pour permettre l'achèvement de l'ouvrage.

Conclusion

En substance, on retiendra que le réaménagement de la RC6 est favorable pour les milieux naturels et améliore les conditions de sécurité pour le trafic. Le lien entre Moutier et le Jura s'en trouve encore plus rectiligne, encore plus proche.

La conception des ouvrages d'art rime avec intégration et l'originalité du profil du tunnel de forme particulière, fait que même s'il est petit, il a tout d'un grand !

through the Roche St-Jean motorway tunnel to permit completion of the structure.

Conclusion

Essentially, the improvement of the RC6 is favourable for the natural environment and improves the safety conditions for traffic. The link between Moutier and the Jura is now straighter and still shorter.

The design of the civil engineering structures, considering the integration and the originality of the very particular profile of the tunnel, mean that, small though it may be, it has everything to make it great!

Auteurs/Authors

Thierry Beuchat
ing. civil dipl. EPFL SIA
Service des Infrastructures,
République et Canton du Jura
thierry.beuchat@jura.ch

Sylvain Plumey
Dr ès sc. techn., ing. civil dipl. EPFL SIA
Bureaux Buchs & Plumey SA et
GVH SA
s.plumey@buchs-plumey.ch

Ersatzneubau Schönenwerdbrücke, Dietikon

Construction of new Schönenwerd bridge in Dietikon

Oliver Müller, Pascal Leu

Einleitung

Die Brücke Schönenwerd in Dietikon überquert die vier SBB-Gleise der Linie Zürich–Bern sowie einen daneben verlaufenden Geh- und Radweg stark schiefwinklig unter ca. 30°. Das Neubauprojekt nahm direkten Bezug auf die sehr einschneidenden Randbedingungen des Bahnbetriebs, und der Unterbruch der Bernstrasse wurde so kurz wie möglich gehalten. Im Bahnbereich wurde eine Stahl-Beton-Verbundkonstruktion eingesetzt. Vier Stahlkästen aus witterfestem Stahl stellen die Haupttragelemente dar. Die Randzone im Bereich über dem Geh- und Radweg ist in Spannbeton ausgebildet. Der Rückbau der bestehenden Brücke (Stahlträgerrost) sowie das Einheben der neuen Brückenträger erfolgten mit grossen Raupenkranen. Der anspruchsvolle Rück- und Neubau erfolgte in weniger als einem Jahr.

Introduction

The Schönenwerd bridge in Dietikon straddles both the SBB (Swiss railway) tracks on the Zürich to Bern line and the adjacent cycle and foot path at a very acute angle of less than 30°. The new construction project directly addressed the very incisive constraints in terms of railway operations and traffic interruption on Bernstrasse road was kept to a minimum. A steel composite structure was used over the tracks. The main structural elements are four steel boxes made of weathering steel. The perimeter area above the cycle and foot path is made of prestressed concrete. Large crawler cranes were used to remove the existing bridge (steel joist structure) and to put the new bridge girders in place. These challenging deconstruction and bridge erection took less than a year.

Wesentliche Randbedingungen

Die bestehende Brücke aus dem Jahr 1935 entsprach den heutigen Anforderungen nicht mehr und musste ersetzt werden. Neben den vier SBB-Gleisen war neu auch ein Rad- und Gehweg zu überbrücken. Eine Zwischenabstützung zwischen Gleis und Radweg wäre grundsätzlich möglich gewesen, die extremen Spannweitenunterschiede, die Anprallgefährdung und die unbefriedigende, eingegangte Führung des Radwegs sprachen jedoch dagegen. Die möglichen Sperrzeiten für Nacharbeiten waren äusserst eng: Zwei Gleise standen während netto rund viereinhalb Stunden zur Verfügung, eine Totalsperrung war nur einmal wöchentlich während netto rund eindreiviertel Stunden möglich. Da während des Rückbaus der alten und der Erstellung der neuen Brücke der Verkehr grossräumig umgeleitet werden musste, war eine möglichst kurze Bauzeit anzustreben, was sich ebenfalls stark auf den Bauablauf und das Tragwerkskonzept auswirkte.

Gesamtkonzept und Gestaltung

Aufgrund der Randbedingungen und insbesondere bestimmt durch die äusserst kurzen Sperrzeiten wurde ein Konzept entwickelt, das eine vom Bahnbetrieb so weit als möglich unabhängige Bauausführung erlaubte und nur für sehr spezifische Arbeiten eine Vollsperrung aller Gleise verlangte. Um die Bauzeit kurz zu halten, wurde zudem bei der Konzeptwahl ein grösstmöglicher Anteil an Vorfabrikation bei gleichzeitiger Minimierung der Bauhilfsmassnahmen im Bahnbereich (Lehr-/Schutzgerüst) angestrebt. Die Geometrie des Querungsbauwerks ergab sich aus der Berücksichtigung



Fig. 1
Brücke und Rad-/Gehweg in Betrieb.
Bridge and cycle and foot path in operation.

Essential parameters

The existing bridge from 1935 no longer met today's requirements and had to be replaced. In addition to the SBB tracks, a cycle and foot path also had to be spanned. While it would have been possible, in principle, to create an intermediate support between the tracks and the cycle and foot path, the different span widths, the risk of a train impact and also the unsatisfactory, narrow course of the path suggested otherwise. The available time slots for night work were extremely tight: two tracks were available for a net period of four and a half hours and a total closure was only possible for a net period of one and three quarter hours once a week. Given that a large-scale diversion of traffic was required in order to remove the old bridge and put the new one in place, the overall aim was that the construction period would be as short as possible. This had a considerable effect on the construction schedule and the structural concept for the bridge.

Global concept and design

Due to the constraints and, in particular, the extremely short track closures, a concept was developed that allowed for the execution of the construction project as independently of rail operations as possible, which meant that the full closure of the tracks was required for very specific works only. In addition, in order to keep the construction period as short as possible, the concept provided for the use of as many prefabricated elements as possible while at the same time minimizing the need for auxiliary construction measures (falsework/support scaffolding) in the vicinity of the tracks. The geometry of the bridge crossing arose from considerations relating to the required clearance profile or minimum distances to the SBB tracks. The abutments are set skewed to the road axis in order to keep the span length as short as possible. The bridge aesthetics was a secondary consideration in view of the

der geforderten Lichtraumprofile bzw. Mindestabstände zu den SBB-Gleisen. Die Widerlager sind gegenüber der Strassenachse schief angeordnet, um die Spannweite so kurz wie möglich zu halten.

Der Gestaltung der Brücke kam in Anbetracht der technischen Problemstellungen und der begrenzten Einsehbarkeit eine eher untergeordnete Rolle zu. Dennoch bestand der Anspruch, dass das Bauwerk im Sinne eines modernen, schlicht gestalteten Ingenieurbauwerks ein seiner hohen technischen Qualität angemessenes Erscheinungsbild haben sollte.

Tragwerkskonzept

Zugunsten einer möglichst unterhaltsarmen Konstruktion wurde die Brücke als integrale Rahmenkonstruktion ausgebildet und die Träger wurden beidseitig monolithisch mit den Brückenwiderlagern verbunden. Die schiefe Lagerung verstärkt die Einspannung der Träger aufgrund der nicht rechtwinklig auf der Längsachse stehenden Widerlagerwände.

Die Gleise überspannt eine Stahl-Beton-Verbundkonstruktion. Vier luftdicht verschweißte Stahlkas-

technical challenges and limited visibility. Nonetheless, the structure was required to have an appearance appropriate to its high level of technical quality and in keeping with a modern engineering structure built with simplicity in mind.

Structural concept

With the aim of creating a structure that would require as little maintenance as possible, the bridge was designed as an integral frame structure and the girders were monolithically connected to the abutment on each side. The skewed line of supports reinforces the fixing of the beams due to the abutment walls that are not at a right angle to the longitudinal axis.

A steel composite structure straddles the tracks. The main structural elements are four airtight welded steel box girders, made of weathering steel, that are arranged in a fan shape in keeping with the varying width of the bridge. The reinforced concrete deck of the composite bridge consists of prefabricated concrete elements that were installed as lost formwork to



Fig. 2

Stark schiefwinkelige Betonvoute beim Rad- und Gehweg mit eingespannten Stahlträgern.

Very acute-angled concrete haunch at the cycle and foot path with restrained steel girders.

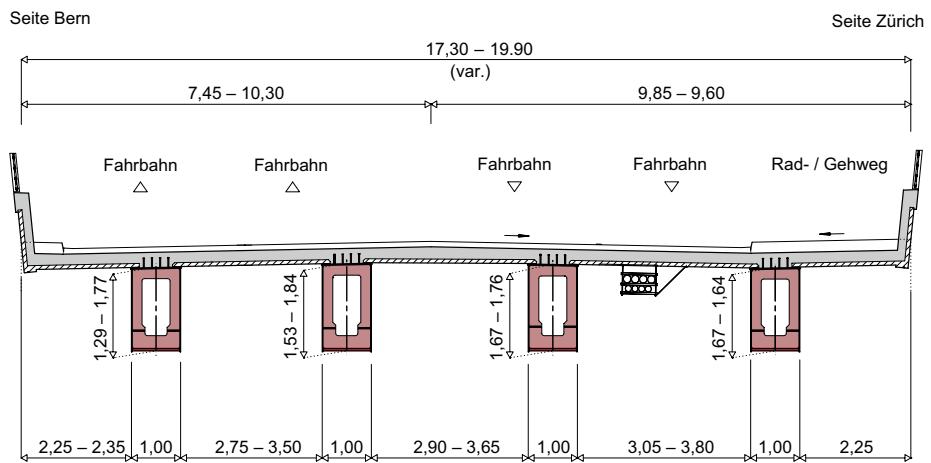


Fig. 3
Brückenquerschnitt.
Bridge cross-section.

ten aus wetterfestem Stahl, die der variablen Brückenbreite entsprechend leicht gefächert angeordnet sind, stellen die Haupttragelemente dar. Die darüberliegende Fahrbahnplatte, die mit den Stahlträgern im Verbund wirkt, besteht aus Fertigbetonteilen, die als verlorene Schalung eingesetzt und mit einer Ortbetonschicht ergänzt wurden.

Ausserhalb des Bahnbereichs, in der Randzone über dem Rad-/Gehweg, konnte ein konventionelles Lehrgerüst eingesetzt werden. Hier wurde der Überbau als Hohlkasten mit variabler Höhe in Spannbeton ausgebildet und mit der Verbundkonstruktion monolithisch verbunden.

Unter Berücksichtigung der erforderlichen Lichtraumbreiten resultiert eine Systemlänge (schiefe Spannweite) von 51 m. Die Schlankheit beträgt bei einer mittleren Konstruktionshöhe von 2,0 m rund $\frac{1}{25}$, was zwar verhältnismässig schlank, aber dank der durch die Schiefe verstärkten Rahmenwirkung noch wirtschaftlich ist. Auf der Brücke werden bis zu fünf Fahrspuren und ein Rad-/Gehweg angeordnet. Die Brückenbreite variiert von 17 m bis 20 m. Die integrale Konstruktion ist trotz der verhältnismässig grossen Länge und Schiefe möglich, da im Vergleich mit einer vorgespannten Ortbetonkonstruktion deutlich geringere (Langzeit-)Verformungen auftreten.

which an in situ layer of concrete was added.

A conventional falsework was used in the peripheral zone above the cycle and foot path, away from the track area. In this case, the superstructure was designed as a prestressed concrete box girder in varying heights and was monolithically connected to the composite structure.

Taking the required clearance widths into account, the system length (oblique span) is 51 m. At an average construction height of 2.0 m, the slenderness is $\frac{1}{25}$ which is relatively slender but still economical thanks to the enhanced restraint effect due to the skew. The bridge has up to five traffic lanes and a cycle and foot path. The width of the bridge varies from 17 m to 20 m. The integral structure is possible despite the considerable length and skew given that considerably fewer (long term) deformations occur compared with a prestressed in situ concrete structure.

At the Schlieren side, the foundation consists of large drilled piles in the load-bearing moraine. At the Dietikon side, the moraine layer is near the surface so that a shallow foundation was possible.

Special design details

Due to the risk of stray current, the post-tensioning cables of the bridge were electrically insulated (Category C).

Das Bauwerk wurde auf der Seite Schlieren mit Grossbohrpfählen in der tragfähigen Moräne fundiert. Auf der Seite Dietikon steht die verschwemmte Moränenschicht hoch an, sodass hier eine Flachgründung möglich war.

Besondere konstruktive Details

Aufgrund der Streustromgefährdung wurde die gesamte Vorspannung der Brücke elektrisch isoliert (Kategorie C) ausgeführt.

Übergang Stahlträger – Betonvoute

Beim Übergang vom Stahl-Beton-Verbundquerschnitt des Überbaus in die Spannbetonkonstruktion der Hohlkastenvoute – etwa im Viertelpunkt der Brückenspannweite – sind die Stahlträger monolithisch mit den Stegen der Hohlkastenvoute verbunden (Fig. 5). Dazu wurden die Spannglieder, die die Betonstege längs vorspan-

Bauherrschaft/Owner
Baudirektion Kanton Zürich,
Tiefbauamt
Projekt und Bauleitung/
Project and site management
dsp Ingenieure + Planer AG, Uster
Gestaltung/Design
Balz Amrein/Architektur/Brückenbau,
Zürich
Ausführung/Execution
Baumeister/Main contractor:
Implenia Schweiz AG, Zürich
Stahlbau/Steel construction:
Senn AG, Oftringen

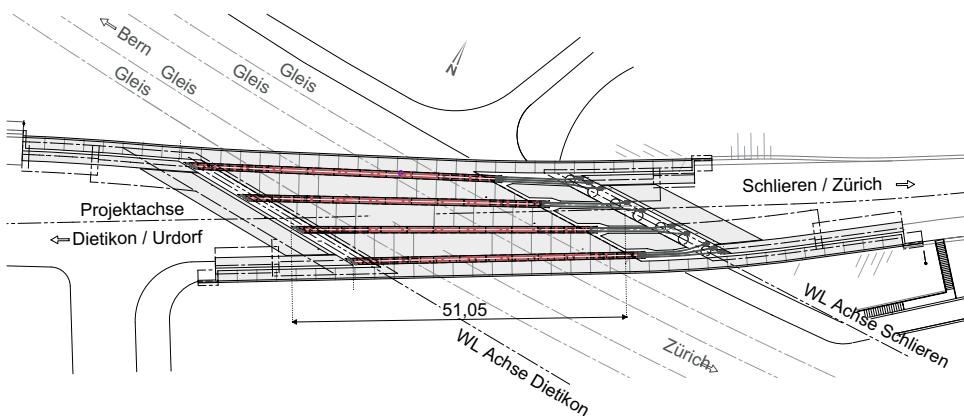


Fig. 4
Brückenuntersicht.
View of the bridge from below.

Transition of steel girder – concrete haunch

At the point of transition between the steel composite section of the superstructure and the haunched prestressed concrete box, approximately the quarter point of the bridge span, the steel girders are monolithically connected to the web of the concrete box girder (Fig. 5). To achieve this, the tendons that post-tension the concrete webs longitudinally are inserted into the steel girders and are anchored there with steel yokes. The position of the tendons in cross-section and the size of the post-tensioning forces were designed in such a way that the joints between the end plate of the steel girders and the concrete webs remain under pressure under service loads (rare load situation). In order to transfer large compressive loads occurring, compressive reinforcements were used in the contact joint, force-fitted with the steel girders. After the cables were stressed, the

chambers of the steel girders in this node were filled with concrete for improved durability.

Rahmenecke Widerlager Schlieren

Die Rahmenecke beim Widerlager Schlieren wird durch eine Aufweitung der auf den Bohrpfählen fundierten Widerlagerwand gebildet. Die Wand wurde von 1,70 m auf 2,40 m verbreitert, damit in

den, bis in die Stahlträger hinein geführt und dort über Stahljoch abgespannt. Die Lage der Spannglieder im Querschnitt und die Grösse der Vorspannkräfte wurden so abgestimmt, dass die Fugen zwischen den Kopfplatten der Stahlträger und den Betonstegen unter Gebrauchslasten (seltener Lastfall) überdrückt bleiben. Zur Einleitung der auftretenden grossen Druckkräfte in der Kontaktfuge wurden kraftschlüssig mit den Stahlträgern verbundene Druckbewehrungen angeordnet. Die Kammern der Stahlträger in diesem Knotenbereich wurden nach dem Spannen der Kabel für eine bessere Dauerhaftigkeit ausbetoniert.

Frame corner at Dietikon abutment

The frame corner at the Schlieren abutment is made by expanding the abutment wall above the drilled piles. The wall was "widened" by 1.70 m to 2.40 m so that the post-tensioning cables could be neatly anchored, resulting in sufficient structural height for absorbing internal forces. The top section was designed as a (concealed) end cross beam with the required strong reinforcement.

Frame corner at Dietikon abutment

The frame corner on the Dietikon side is created by inserting the steel girders into the abutment wall. To this end, tendons in the outer part of the frame corner were drawn vertically through the steel girders and fixed to them directly (Fig. 6). Large compressive forces are to be transferred in the inner part of the frame corner, at the visible side of the abutment wall. A stainless steel tilt strip that is firmly joined with a compressive reinforcement, transfers these forces to the concrete. The tilt strip is a non-replaceable component for force transmission and not a bearing (there is no movement in its final state). In the abutment wall, the tendons run down into the foundation slab.

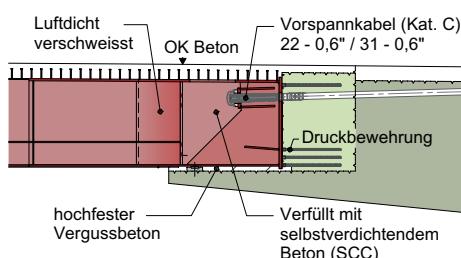


Fig. 5
Übergang Stahlträger-Betonvoute auf Seite Schlieren.
Transition of steel girder – concrete haunch on the Schlieren side.

der Rahmenecke die Vorspannkabel sauber verankert werden konnten und sich eine genügende statische Höhe zur Aufnahme der Schnittkräfte ergab. Ihr Kopfbereich wurde als (versteckter) Endquerträger mit entsprechend starker Bewehrung ausgebildet.

Rahmenecke Widerlager Dietikon

Die Rahmenecke auf der Seite Dietikon wird im Wesentlichen durch die Einspannung der Stahlträger in die Widerlagerwand gebildet. Dazu wurden Spannglieder im äusseren Teil der Rahmenecke vertikal durch den Stahlträger geführt und direkt gegen diesen abgespannt (Fig. 6).

Im inneren Teil der Rahmenecke – an der sichtbaren Front der Widerlagerwand – sind grosse Druckkräfte aufzunehmen. Eine Kippleiste aus rostfreiem Stahl, die kraftschlüssig mit einer Druckbewehrung verbunden ist, leitet diese Kräfte in den Beton ein. Bei der Kippleiste handelt es sich um ein nicht austauschbares Bauteil zur Krafteinleitung und nicht um ein Lager (im Endzustand treten keine Bewegungen auf). Die Spannglieder verlaufen in der Widerlagerwand bis in die Fundamentplatte hinunter. Sie weisen an ihren Tiefpunkten aber keine Anker auf, sondern werden in einer Schlaufe durch die Fundamentplatte geführt und beim benachbarten Stahlträger wieder

However, they do not have an anchor at their lowest point but are drawn in a loop through the foundation and upwards again through the adjacent steel girder. There are anchors at each end of the tendon that are simultaneously stressed.

Construction

A provisional bridge was built for non-motorized traffic before the existing bridge was closed. The super structure (with the exception of the pavement and parts of the bridge in the peripheral areas) had to be removed at night. When the tracks were shut down, the concrete parapets, the pathway and the deck slab were cut into smaller parts and removed by crane. The remaining steel structure, including a provisional structure and suspension equipment, weighed approx. 186 t. It was removed with a crawler crane while all tracks were shut down. Afterwards a protective scaffolding was set up on each side of the tracks so that the existing abutments could be removed and the new substructures erected without having to completely shut down the tracks. The greater part of the abutments were demolished during the day with this protection in place. The new substructures (including pile foundation at the Schlieren side) were also built during the day behind the safety scaffoldings. The concrete haunch at the Schlieren side

nach oben gezogen. An beiden Enden des Spannglieds sind Spannanker angeordnet, die simultan vorgespannt wurden.

Bauausführung

Vor der Sperrung der bestehenden Brücke wurde eine Hilfsbrücke für den Langsamverkehr erstellt. Der Rückbau des Überbaus (mit Ausnahme von Belag und Brückenteilen in Randbereichen) musste nachts erfolgen. Bei gesperrten Gleisen wurden die Betonbrüstungen, die Gehwegplatten und die Fahrbahnplatte in Elemente geschnitten und mit Pneukranen herausgehoben. Die verbleibende Stahlkonstruktion wies inkl. Hilfskonstruktionen und Aufhängevorrichtung ein Gewicht von rund 186 t auf. Sie liess sich mit einem Raupenkran in einer Totalsperre herausheben.

Um den Rückbau der bestehenden Widerlager und die Errichtung der neuen Unterbauten unabhängig von Gleissperrungen ausführen zu können, wurde vorgängig beidseits der Gleisanlage ein Schutzgerüst erstellt. In dessen Schutz konnte der Grossteil der Widerlager tagsüber abgebrochen werden. Die neuen Unterbauten (inkl. Pfahlfundation Seite Schlieren) konnten hinter den Schutzgerüsten ebenfalls in Tagarbeit erstellt werden. Die Betonvoute auf Seite Schlieren wurde mit einem Trägergerüst, ebenfalls hinter dem Schutzgerüst, errichtet.

Für die Montage der vier Stahlträger kam wiederum ein Raupenkran zum Einsatz. Es wurden jeweils zwei Träger über Joche miteinander verbunden und gemeinsam eingehoben. Dadurch wurden lediglich zwei Wochenenden für den Einhub beansprucht. Unmittelbar nach dem Setzen der Träger wurde der Fugenschluss am Trägerende Seite Schlieren realisiert. Um die Zwängungskräfte infolge Vorspannung gering zu halten, wurden die Stahlträger auf Seite Dietikon erst nach dem Spannen der horizontalen Kabel in der Betonvoute monolithisch mit der Widerlagerwand verbunden. Die Träger wurden dazu mit



Fig. 6
Rahmenecke Widerlager Dietikon mit vertikaler Loopverankerung.
Frame corner of abutment Dietikon with vertical loop tendons.

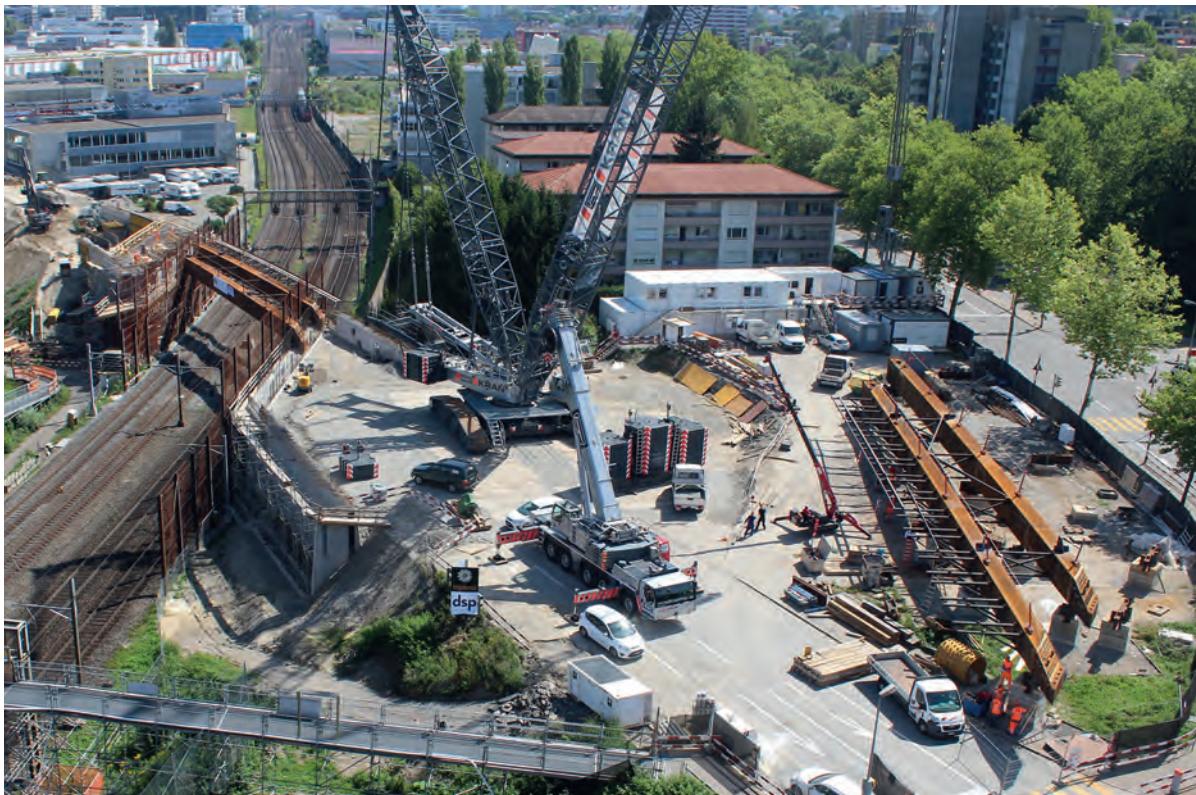


Fig. 7

Installationsplatz mit Raupenkran, erstes Trägerpaar eingehoben.
Installation location with crawler crane, first set of girders set in place.

was built using a falsework behind the safety scaffolding. Once again, a crawler crane was used to install the four steel girders. In each case two girders were tied together with a yoke and lifted together. As a result, only two weekends were required for the lifting work. Immediately after the girders were installed, the closure pour at the end of the steel girder on the Schlieren side was realized. In order to keep the constraint forces resulting from post-tensioning to a minimum, the steel girders at the Dietikon side were monolithically connected to the abutment wall only after the horizontal tendons were tensioned in the concrete haunch. To this end, the girders were undergrouted with fast curing concrete and tensioned after that with the vertical loop tendons to the abutment wall on the Dietikon side. As soon as the steel girders were tensioned to the concrete haunch on the Schlieren side, the prefabricated concrete elements were installed as lost formwork. The

schnellerhärrendem Beton untergossen und danach mit den vertikalen Loop-Spanngliedern mit der Widerlagerwand Dietikon verspannt.

Sobald die Stahlträger mit der Betonvoute auf Seite Schlieren zusammengespannt waren, konnten die vorfabrizierten Betonelemente als verlorene Schalung verlegt werden. Die Randelemente wurden mit vormontierten Stahlhilfskonstruktionen gegen die Stahlträger abgestützt. Danach wurde die Bewehrung der Fahrbahnplatte vor Ort ergänzt und die Platte in einem Guss betoniert. Erst danach wurden die Hilfskonstruktionen wieder ausgebaut.

Nach der Fertigstellung der Betonfahrbahnplatte folgten die Brückenausbauarbeiten wie Schleppplatten, Abdichtung und Brückenbelag sowie der noch verbleibende Teil der generellen Strassenbauarbeiten in Tagarbeit. Nach der Verkehrsübergabe wurde die Hilfsbrücke demontiert und die Umgebungsarbeiten wurden abgeschlossen.

edge elements were propped up against the steel girders with pre-mounted steel auxiliary structures. After that, the reinforcement of the bridge deck was placed and the deck was concreted in one pour. The auxiliary structures were only removed again after this. Once the concrete bridge deck was in place, the bridge finishing works such as transition slabs, sealing and bridge pavement as well as the remaining works of the general road construction were carried out during the day. The auxiliary bridge was dismantled and the surrounding works completed once the bridge was opened to traffic.

Autoren/Authors

Oliver Müller
dipl. Bauing. ETH, PE
oliver.mueller@dsp.ch

Pascal Leu
MSc ETH Bau-Ing.
pascal.leu@dsp.ch

dsp Ingenieure + Planer AG
CH-8610 Uster

Die Letzigrabenbrücke und die Kohlendreieckbrücke

The Letzigraben bridge and the Kohlendreieck bridge

Aldo Bacchetta, Luc Tausch, Stephan Etter



Fig. 1
Letzigrabenbrücke über dem Gleisfeld.
Letzigraben bridge over the tracks.

Einleitung

Bei der Durchmesserlinie Altstetten-Zürich HB-Oerlikon (DML) handelt es sich um eine 9,6 km lange Neubaustrecke für den Bahnverkehr. Sie wurde 2015 eröffnet und erhöht seither die Kapazität des Zürcher Hauptbahnhofs deutlich. Im Rahmen der DML wurden neben dem Bahnhofsausbau Oerlikon, dem Weinbergtunnel und dem Durchgangsbahnhof Löwenstrasse die Kohlendreieckbrücke (KDB) und die Letzigrabenbrücke (LGB) erstellt. Sie überqueren elegant die Gleisfelder im Westteil des Hauptbahnhofs Zürich (Fig. 1).

Brücken

Die beiden eingleisigen Spannbetonbrücken sind bezüglich Tragwerkskonzept und Gestaltung nahezu identisch. Mit einer Länge von 1156 m ist die Letzigrabenbrücke die längste (fugenlose) Brücke im Streckennetz der Schweizerischen Bundesbahnen (SBB). Mit den beidseitig angeordneten Rampenbauwerken beträgt die Bauwerkslänge sogar 1578 m. Die

Introduction

The Cross-City Line (CCL) Altstetten–Zürich Central Station–Oerlikon is a 9.6 km long new line for railway traffic. It was opened in 2015 and has increased the capacity of Zürich Central Station considerably since then. In addition to developing Oerlikon railway station, to the Weinberg tunnel and the Löwenstrasse through station, the Kohlendreieck bridge (KDB) and the Letzigraben bridge (LGB) were built as part of the CCL. The bridges cross the tracks elegantly in the western section of Zürich Central Station (Fig. 1).

Bridges

The two single-track, prestressed concrete bridges are almost identical in terms of structural concept and design. The Letzigraben bridge, at a length of 1156 m, is the longest (jointless) bridge in the route network of the Swiss Federal Railways (SBB). With the ramp structure on each side, the total length is actually 1578 m. The longitudinally fully prestressed

längs voll vorgespannte Balkenbrücke trägt als Durchlaufträger über 24 Felder mit Spannweiten zwischen 35 m und 60 m. Beim Brückenträger handelt es sich um einen 10 m breiten Trogquerschnitt mit abschnittsweise konstanter Höhe von 3,20 m (Felder 1–14) bzw. 3,70 m (Felder 17–24). Die gegen aussen geneigten Stege schaffen Platz für beidseitige Dienstwege neben dem Gleis ohne dabei die Querspannweite zu vergrössern (Fig. 2). Zudem treten die geneigten Flächen optisch in den Hintergrund, begünstigen den Schattenwurf des Konsolkopfs und sorgen damit für ein elegantes Erscheinungsbild des Überbaus (Fig. 3).

Die Kohlendreieckbrücke ist mit einer Brückenzahl von 396 m und einer Gesamtlänge inkl. Rammen von 745 m deutlich kürzer als die Letzigrabenbrücke. Die Spannweiten der acht Felder betragen zwischen 40 m und 62 m. Die Abmessungen des Überbaus entsprechen mit einer Querschnittshöhe von 3,70 m jenen des westli-

beam bridge supports 24 spans with span widths of between 35 m and 60 m. The bridge girder is a 10 m wide trough cross-section with a constant height in sections of 3.20 m (spans 1–14) or 3.70 m (spans 17–24). The outwardly inclined webs create space for service channels on each side of the track without the need to enlarge the transverse span (Fig. 2). In addition, the inclined surfaces merge visually into the background, benefit the shadow cast by the cantilever head and thereby ensure the elegant appearance of the superstructure (Fig. 3). The Kohlendreieck bridge, with a length of 396 m and a total length incl. ramps of 745 m, is considerably shorter than the Letzigraben bridge. The span widths of the eight spans are between 40 m and 62 m, the dimensions of the superstructure, at a section height of 3.70 m, correspond to that of the western part of the Letzigraben bridge. With a minimum curve radius of 330 m, the Kohlendreieck bridge is very curved for a railway bridge.

The round, 2.5 m thick and 5 to 18 m high piers on both bridges widen out at the pierhead into a cranked, oval bearing benching on which two pot bearings are placed in each case (Fig. 4). The bridges are floatingly supported in a longitudinal direction. Two

chen Teils der Letzigrabenbrücke. Mit einem minimalen Krümmungsradius von 330 m ist die Kohlendreieckbrücke recht stark gekrümmt für eine Eisenbahnbrücke.

Die runden, 2,5 m dicken und 5 bis 18 m hohen Pfeiler beider Brücken weiten sich am Pfeilerkopf in eine abgekröpfte, ovale Lagerbank aus, auf der jeweils zwei Topflager platziert sind (Fig. 3). Die Brücken sind in Längsrichtung schwimmend gelagert. Zwei Portalrahmen und die beiden nächstgelegenen Pfeiler stabilisieren die Letzigrabenbrücke in Längsrichtung, während dies bei der Kohlendreieckbrücke die mittleren fünf Pfeiler tun. Auf den übrigen Pfeilern und den Widerlagern wird der Überbau nur seitlich geführt. Sowohl die Pfeiler als auch die Portalrahmen sind auf 6 bis 8 Ortbetonpfählen mit einem Durchmesser von 150 cm und Längen von über 40 m fundiert.

Bauvorgang

Für die Erstellung der Brücken mussten die bestehenden Gleise teilweise umgebaut und das neue Trassee freigehalten werden. Diese Arbeiten im hochfrequentierten Gleisbereich konnten zu einem grossen Teil nur in den Zugspausen während der Nacht stattfinden. Die Pfahlungs-, Fundament-, Pfeiler-, Widerlager- und

portal frames and two adjacent piers stabilise the Letzigraben bridge in a longitudinal direction while the central five piers take on this function in the case of the Kohlendreieck bridge. On the remaining piers and the abutments, the superstructure is only guided laterally. Both the piers and also the portal frames are founded on 6 to 8 in situ concrete piles with a diameter of 150 cm and lengths of over 40 m.

Construction

In order to build the bridges, the existing tracks had to be reconstructed in parts and the new track kept free. Most of these works in the high-frequency track area could only be carried out during train breaks at night-time. The pile, foundation, pier, abutment and ramp works were carried out with sufficient run in time compared with the superstructure, of approx. 3 years in the case of the Letzigraben bridge and approx. 1 year for the Kohlendreieck bridge. The Letzigraben bridge was erected from east to west using a 91 m long, 12 m wide and 11 m high overhead movable scaffolding system (Fig. 4). The movable scaffolding system at a total weight of 290 t stretches over two adjacent piers, allowing for the bridge to be erected without interim supports on the tracks. The two large,



Fig. 2
Brückenquerschnitt der Letzigrabenbrücke im Bau.
Cross-section of the Letzigraben bridge under construction.



Fig. 3
Eleganter Überbau der Letzigrabenbrücke mit geneigten Stegen und Konsolkopf.
Elegant superstructure of the Letzigraben bridge with inclined webs and cantilever head.



Fig. 4

Letzigrabenbrücke – Erstellung des Überbaus mittels Vorschubgerüst.

Letzigraben bridge – erecting the superstructure using a movable scaffolding system.

Rampenarbeiten erfolgten mit einem genügenden Vorlauf gegenüber dem Überbau von etwa drei Jahren bei der Letzigrabenbrücke und etwa einem Jahr bei der Kohlendreieckbrücke.

Die Letzigrabenbrücke wurde mit einem 91 m langen, 12 m breiten und 11 m hohen obenliegenden Vorschubgerüst (Fig. 4) von Osten nach Westen erstellt. Das insgesamt 290 t schwere Vorschubgerüst überbrückte zwei benachbarte Pfeiler, was ein Erstellen der Brücke ohne Zwischenabstützungen im Gleisfeld ermöglichte. Die beiden grossen Hauptträger des Gerüsts standen bereits zehn Jahre früher für den Bau der Rhonebrücken am Südportal des Lötschberg-Basistunnels bei Raron im Einsatz. Die restlichen Anbauten sowie die Mechanik und Hydraulik wurden speziell für die Letzigrabenbrücke konzipiert und vor Ort zusammengebaut. Mit einem Fünf-Wochentakt wurden für den Bau der 24 Etappen rund zweieinhalb Jahre benötigt.

Im Gegensatz zur Letzigrabenbrücke wurde die kleinere und stärker gekrümmte Kohlendreieck-

main beams in the formwork were already used for the construction of the Rhone bridge at the south portal of the Lötschberg base tunnel near Raron 10 years earlier. The remaining elements and the mechanics and hydraulics were specially designed for the Letzigraben bridge and were assembled on site. Based on a five-week cycle, it took about two and a half years to build the 24 stages. In contrast to the Letzigraben bridge, the smaller and more curved Kohlendreieck bridge was erected using a conventional false-work that served at the same time as a safety scaffolding at the transition of the various tracks. One particular challenge when erecting the Kohlendreieck bridge was crossing over the listed Hilfiker building at Kohlendreieck (Fig. 5). The space available for the falsework between the upper edge of the building and the lower edge of the bridge was only 80 cm high.

Unballasted track

Fine cracks were detected in the bridge trough over the piers dur-

brücke mit einem konventionellen Lehrgerüst, das zugleich beim Übergang der verschiedenen Gleise als Schutzgerüst fungierte, in einem Sechs- bis Acht-Wochen-Takt erstellt. Eine besondere Herausforderung bei der Errichtung der Kohlendreieckbrücke war die Überquerung des denkmalgeschützten Hilfiker-Gebäudes im Kohlendreieck (Fig. 5). Zwischen der Oberkante des Gebäudes und der Unterkante der Brücke stand für das Lehrgerüst nur eine Höhe von rund 80 cm zur Verfügung.

Feste Fahrbahn

Noch während dem Bau der Überbauten wurden bei einer visuellen Kontrolle feine Risse im Brückentrog über den Pfeilern festgestellt. Bei der erneuten Überprüfung der Krafteinleitung in die exzentrisch unter den geneigten Stegen gelegenen Pfeiler zeigte sich, dass die Trogplatte mit einer minimalen Dicke von 61 cm in Brückenquerrichtung zu schwach dimensioniert war. Der Exzentrizität des Schnittpunkts der geneigten Stegachsen und der Achse der Trogplatte bezüglich der Lager-

ing a visual inspection while the superstructures were still under construction. When re-examining the force transmission into the piers eccentrically placed beneath the inclined webs, it was found that the trough slab with a minimum thickness of 61 cm was insufficiently dimensioned in the transverse direction of the bridge. Too little attention had been paid to the eccentricity of the intersection of the inclined web axes and the axis of the trough slab with regard to the bearing axis of approx. 67 cm (Fig. 6). The slightly indirect support of the webs together with bearing forces of up to 23 MN at the design level leads to significant deflection forces that can only spread to a limited extent in the trough slab.

After an intense search for a solution, the best option for removing the structural defect at each bridge was determined in consultation with the SBB and the Swiss Federal Office for Transport. This involved strengthening the trough slab in the area of the columns over a length of 8.0 m with a reinforced concrete layer and a transverse prestress (Fig. 7). The transverse prestressing for absorbing the deviation forces consists of 6 or 8 electrically insulated (Category C) cables each with 12 strands ø 15.7 mm. This required core drillings ø 125 mm through the webs and specially made steel anchors.

achse von rund 67 cm (Fig. 6) war zu wenig Beachtung geschenkt worden. Die geringfügig indirekte Lagerung der Stege führt zusammen mit Lagerkräften von bis zu 23 MN auf Bemessungsniveau zu bedeutenden Ablenkkräften, die sich in der Trogplatte nur bedingt ausbreiten können.

Nach einer intensiven Lösungs-suche wurde in Absprache mit der SBB und dem Bundesamt für Verkehr die Bestvariante zur Behebung des statischen Mangels an beiden Brücken festgelegt. Dabei wurde die Trogplatte im Stützenbereich auf einer Länge von 8,0 m mit einem bewehrten Aufbeton und einer darin verlegten Quervorspannung verstärkt (Fig. 7). Die Quervorspannung zur Aufnahme der Umlenkkräfte besteht aus elektrisch isolierten (Kategorie C), auf den Steg-Aussenseiten verankerten 6 bzw. 8 Kabeln à 12 Litzen ø 15,7 mm. Dafür waren Kernbohrungen ø 125 mm durch die Stege und speziell angefertigte Verankerungen aus Stahl notwendig. Die Ankerköpfe wurden zum Schutz vor der Witterung mit einer Blechverkleidung abgedeckt. Der Verbund zwischen dem ursprünglichen Trogquerschnitt und dem faserverstärkten Aufbeton wird durch die mit Hochdruckwasserstrahl aufgerauhte Betonoberfläche und eine eingeklebte Bewehrung in der Verbundfuge gewährleis-tet.

Bauherr/Owner

SBB AG und Kanton Zürich

SBB Grossprojekt DML/

Projekte Region Ost

Planung und Bauleitung/Planning and site management

Ingenieurgemeinschaft SLW Partner:

- Locher Ingenieure AG, Zürich (FF)

- Jauslin + Stebler AG, Zürich

- Bänziger Partner AG, Zürich

- Wild Ingenieure AG, Zürich

- Gruner AG, Zürich

Gestaltung/Design

Eduard Imhof, Luzern

Ausführung/Execution

Unternehmer/Contractors:

Arbeitsgemeinschaft ABD

- Strabag AG, Zürich (FF)

- Stutz AG, Zürich

- Anliker AG, Emmenbrücke

- Kibag AG, Zürich

- Frutiger AG, Zürich

Bahntechnik/Railway technology:

SBB AG Instandhaltung Region Ost

The anchor heads were covered with a sheet covering to protect them from the weather. The bond between the original trough cross-section and the fibre-reinforced concrete layer is ensured by the concrete surface roughened with a high-pressure water jet and a glued reinforcement in the joint. The increase of approx. 0.5 m in the slab thickness in the area of the columns required the replacement of the ballasted track with an unballasted track across the entire length of the bridge. Outside of the strengthened areas, the unballasted track is laid in various different sections on an unreinforced



Fig. 5

Kohlendreieckbrücke – Überquerung des Hilfiker-Gebäudes.
Kohlendreieck bridge – passing over the Hilfiker building.

Technische Daten

Rohbau 2009–2013

Baukosten Rohbau CHF 180 Mio.

Gesamtlänge ca. 2,4 km

Brückenlängen 1156 m / 394 m

Brückenbreite 10,0 m

Trägerhöhe 3,2–3,7 m

Anzahl Pfeiler 23 Stk. / 7 Stk.

Max. Pfeilerhöhe 18 m / 9 m

Betonkubatur 31 500 m³ / 11 800 m³

Technical data

Shell structure 2009–2013

Cost of shell structure 180 million CHF

Total length approx. 2.4 km

Bridge lengths 1156 m / 394 m

Bridge width 10.00 m

Beam height 3.2–3.7 m

Number of piers 23 no. / 7 no.

Max. pier height 18 m / 9 m

Concrete 31,500 m³ / 11,800 m³

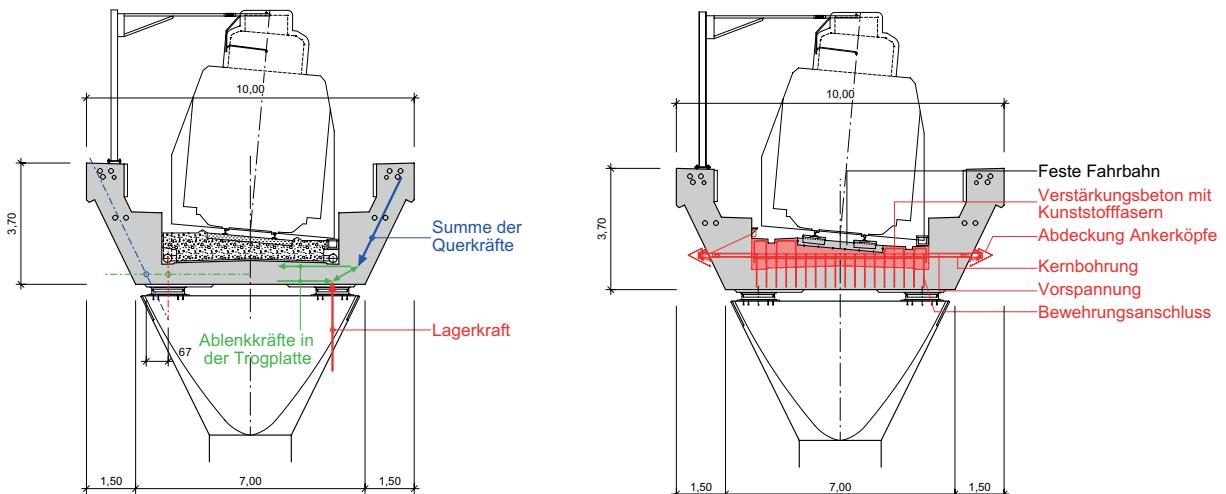


Fig. 6
Krafteinleitung der Lagerkräfte in die Brückenstege.
Introduction of bearing forces into the bridge webs.

Fig. 7
Verstärkung der Trogplatte und feste Fahrbahn.
Strengthening of the trough slab and unballasted track.

Die Erhöhung der Plattenstärke um rund 0,5 m in den Stützenbereichen erforderte den Ersatz der Schotterfahrbahn durch eine feste Fahrbahn über die gesamte Brückenlänge. Ausserhalb der verstärkten Bereiche liegt die feste Fahrbahn über weite Bereiche auf einer unbewehrten Betonunterlage. Der Verbund zum ursprünglichen Betontrog erfolgt über die aufgerauta Altbetonoberfläche. Zur Reduktion der Rissbildung wurden sowohl dem bewehrten Verstärkungsbeton als auch dem unbewehrten Beton ein Schwindkompensationsmittel und Kunststofffasern beigegeben. Die feste Fahrbahn wurde mit einem Vergussbeton in den vorbereiteten Trog im Verstärkungsbeton bzw. in der Betonunterlage eingebaut (Fig. 8). Auf eine Abdichtung wurde verzichtet.

Die notwendig gewordenen Verstärkungsmassnahmen wurden im Winter 2014/2015 ausgeführt, so dass die beiden Bauwerke wie geplant im Dezember 2015 dem Verkehr übergeben werden konnten.

Deformationsversuche

Da es sich bei dem Einbau einer monolithischen festen Fahrbahn auf einer Brücke der SBB um ein Novum handelte, wurden systematische Deformationsversuche durchgeführt. Ziel der Versuche war die Bestätigung des ange-

nommenen Tragwerkverhaltens der beiden verstärkten Brücken und die Verifikation der berechneten Verformungen für die feste Fahrbahn.

The bond with the original concrete trough is by means of the roughened surface of the old concrete. To reduce the occurrence of cracks, a shrinkage compensation agent and synthetic fibres were added to the reinforced concrete and to the unreinforced concrete. The unballasted track was installed into the prepared trough in the reinforcing concrete and into the concrete base using a grout concrete (Fig. 8). A sealing was dispensed with. The strengthening measures that had become necessary were carried out in the winter of 2014/15 so that it was possible to hand the two structures over for traffic, as planned, in December 2015.

Deformation tests

Given that this was the first time a monolithic unballasted track was installed on an SBB bridge, systematic deformation tests were carried out. The objective of the tests was to confirm the assumed structural behaviour of the two strengthened bridges and to verify the calculated deformations for the unballasted track.

The load applied consisted of five (Letzigraben bridge) and six (Kohlendreieck bridge) engines, type Re 620, corresponding to a load of approx. 62 kN/m. The trains were stationary on the bridge during the static tests and were

nommenen Tragwerkverhaltens der beiden verstärkten Brücken und die Verifikation der berechneten Verformungen für die feste Fahrbahn.

Die Belastung erfolgte mit fünf (LGB) respektive sechs (KDB) Lokomotiven des Typs Re 620, was einer Last von rund 62 kN/m entsprach. Bei den statischen Versuchen standen die Züge auf den Brücken, während sie bei den quasistatischen und dynamischen Versuchen mit Geschwindigkeiten von 5 km/h bzw. 30 km/h fuhren. Das Tragverhalten der beiden Brücken unter hoher Belastung ist wie erwartet tadellos. Weder während der Versuche noch bei der Auswertung der Resultate konnten Auffälligkeiten ausgemacht werden. Die grösste bei den Versuchen gemessene Durchbiegung beträgt rund $1/7000$ der entsprechenden Spannweite, während sich in den Stützenquerschnitten keine nennenswerten Querschnittsverformungen beobachten liessen. Bei der gekrümmten Kohlendreieckbrücke war der Einfluss der Zentrifugalkraft auf die Verdrehungen der Träger trotz der geringen Geschwindigkeit von 30 km/h deutlich messbar.

Schlussfolgerungen

Bei den Brücken der DML handelt es sich um imposante Bauwerke, die sich dank ihrer schlchten



Fig. 8
Feste Fahrbahn.
Unballasted track.

travelling at speeds of 5 km/h and 30 km/h during the quasi-static and dynamic tests respectively.

As expected, the structural behaviour of the two bridges under high loads is impeccable. No anomalies were detected either during the tests or when the results were being analysed. The largest measured deflection during the tests was approx. $1/7000$ of the corresponding span, while no noteworthy cross-sectional deformations were observed in the column cross-sections. In the case of the curved Kohlendreieck bridge, the influence of centrifugal force on the girder torsions was clearly measurable despite the low speed of 30 km/h.

Conclusions

The bridges of the Cross-City Line are imposing structures, which, thanks to their simple elegance, merge seamlessly into the surroundings shaped by the railway infrastructure systems. The structural deficiency in the original project is a clear example of how apparently small eccentricities can have a fatal effect in the case of large forces. Careful consideration should be given to attributed "small" bearing displacements carried out in the course of a project with this cross-section type. The structural deficiencies were all removed with the chosen

Eleganz mühelos in die von Bahninfrastrukturanlagen geprägte Umgebung eingliedern. Der statische Mangel beim ursprünglichen Projekt zeigt exemplarisch, wie sich vermeintlich kleine Exzentrizitäten bei grossen Kräften fatal auswirken können. Namentlich im Laufe des Projekts erfolgenden «kleinen» Lagerverschiebungen sind bei diesem Querschnittstyp grosse Beachtung zu schenken. Mit den gewählten Verstärkungsmaßnahmen konnten sämtliche statischen Mängel behoben werden, ohne das Erscheinungsbild der Brücken zu beeinträchtigen. Ferner zeigte sich das Potenzial von festen Fahrbahnen auf grossen Brückenbauwerken aus statischer und konstruktiver Sicht. Die bei den Deformationsversuchen bestätigte, sehr hohe Steifigkeit der Brücken dürfte einen wesentlichen Beitrag zu einem dauerhaft hohen Fahrkomfort auf den Brücken leisten.

Dass die Projektänderung trotz schwieriger Umstände so rasch umgesetzt und die Brücken termingerecht dem Verkehr übergeben werden konnten, ist dem lösungsorientierten Vorgehen der massgebenden Entscheidungsträger aller Parteien zu verdanken und verdient grössten Respekt.

strengthening measures without affecting the appearance of the bridges. Furthermore, the potential of unballasted tracks on large bridge structures from a structural and design point of view was demonstrated. The very great stiffness of the bridges confirmed during the deformation tests should make a considerable contribution to a permanently high level of comfort on the bridges. The fact that, despite the difficult circumstances, the revised project was implemented so quickly and the bridges handed over for traffic on schedule is due to the solution-oriented approach of the governing decision makers of all parties involved and deserves our greatest respect.

Autoren/Authors

Aldo Bacchetta
dipl. Bauing. ETH
a.bacchetta@bp-ing.ch

Luc Tausch
Dr. sc. techn., dipl. Bauing. ETH,
l.tausch@bp-ing.ch

Stephan Etter
Dr. sc. ETH, dipl. Bauing. ETH
s.etter@bp-ing.ch

Bänziger Partner AG, CH-8045 Zürich

Vierte Eisenbahnbrücke über die Vispa in Visp

Fourth railway bridge over the Vispa river in Visp

Martin Diggelmann

Einleitung

Die Schweizerischen Bundesbahnen (SBB) nahmen 2017 ein viertes Gleis zwischen Visp und St. German in Betrieb, um die Kapazität der Zufahrt zum Lötschberg-Basistunnel zu erhöhen. Dazu wurde unter anderem westlich des Bahnhofs Visp eine weitere Brücke über den Fluss Vispa erforderlich. Zudem bedingte der neue Güterumschlagterminal der Matterhorn-Gotthard-Bahn ebenfalls eine Verbindung über die Vispa. Aus Platzgründen fiel die Wahl auf eine zweigleisige Brücke mit auskragendem Gehweg. Als Teil des Projekts wurde die angrenzende Straßenunterführung ebenfalls um zwei Gleise erweitert (Fig. 1). Da bereits die drei bestehenden Brücken von 1977 als einfeldrige Trogbrücken erstellt worden waren, lag für die vierte Brücke das

Introduction

In 2017, the Swiss federal railways (SBB) opened up a fourth track between Visp and St. German to increase capacity on the approach to the Lötschberg base tunnel. In order to do this, among other things, an additional bridge over the Vispa river was required west of Visp railway station. The new goods transhipment terminal on the Matterhorn-Gotthard line (MGBahn) also required a connection over the Vispa river. For reasons of space, a double-track bridge with a cantilever pathway was chosen. The project also involved expanding the adjacent underpass with two tracks (Fig. 1). As the three existing bridges from 1977 are single-span trough bridges, the same structural concept for the fourth bridge was an obvious choice for aesthetic rea-

gleiche Tragwerkskonzept primär aus ästhetischen Gründen nahe. Besonders zu erwähnen sind die geometrischen und hydraulischen Anforderungen sowie die Auflagen betreffend Hochwasser während des Baus.

Nutzungsanforderungen

Bahnverkehr

Die vierte Vispabrücke trägt ein Normalspur- und ein Schmalspurgleis. Die Schotterstärke bis Unterkante Schwelle beträgt 55 cm. Die hohe Ausbaugeschwindigkeit des Normalspurgleises für 160 km/h setzt eine geringe Durchbiegung voraus.

Hydraulische Anforderungen

Um das Durchflussprofil der Vispa für ein 100-jährliches Hochwasser von 330 m³/s zu gewährleisten, muss die Untersicht der neuen

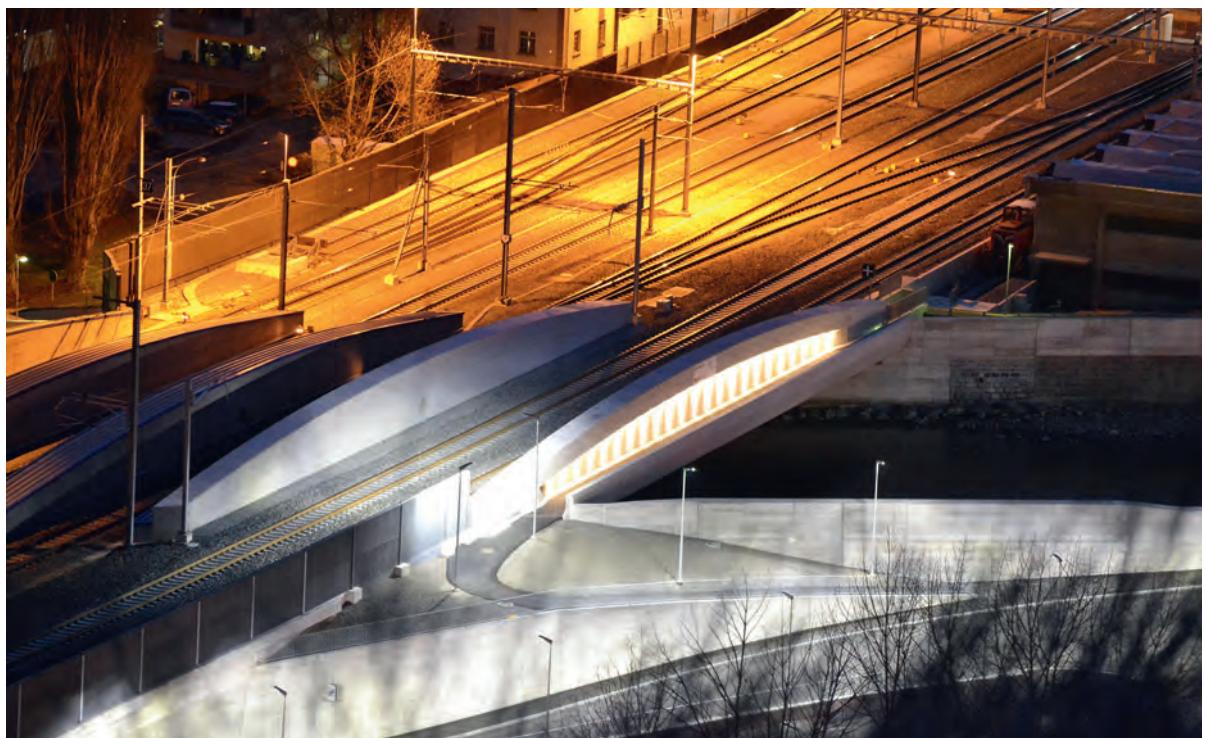


Fig. 1
Vierte Brücke über die Vispa.
Fourth bridge over the Vispa river.

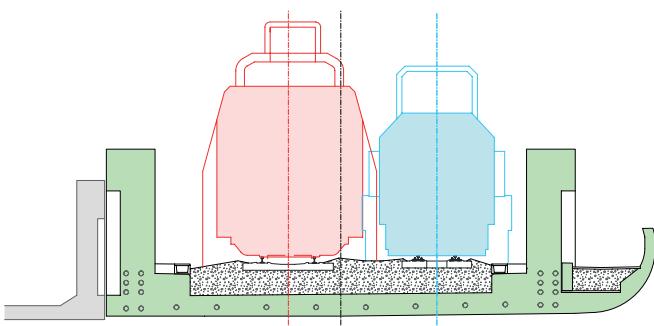


Fig. 2
Querschnitt der Trogbrücke mit auskragendem Gehweg
(links SBB, rechts MGBahn).
Cross-section of the trough bridge with cantilever pathway
(left SBB, right MGBahn).

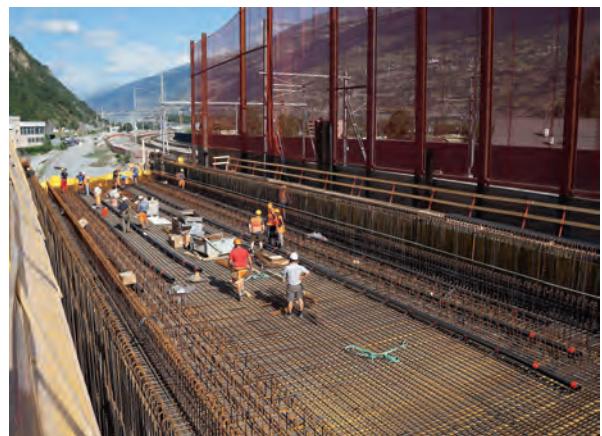


Fig. 3
Bewehrung des Brückentrogs.
Reinforcement of bridge trough.

sons. Special mention should be made of the geometric and hydraulic requirements and the conditions relating to flooding during construction.

Service requirements

Railway traffic

The fourth Vispa bridge has a normal track and a narrow-gauge track. The ballast thickness up to the lower edge of the sleeper is 55 cm. The considerable design speed of the normal track for 160 km/h requires low deflection.

Hydraulic requirements

In order to ensure the flow profile of the Vispa river for a 100-year flood of 330 m³/s, the bottom line of the new bridge has to be 10 cm higher than the existing one. On the upstream side, the parapet of the footbridge has to be formed in a quarter-circle in order to facilitate the drainage capacity of the Vispa in the event of congestion. The height of the old side walls also had to be raised upstream. During the state of construction, constrictions of the riverbed are only permitted in the winter months November to April and temporary supports in the riverbed from December to February.

Earthquake

The bridge of construction class II is located in Switzerland's highest danger zone, Z3b, and due to the poor subgrade, in ground class E. Given the high level of stiffness of

Brücke gegenüber der bestehenden um 10 cm höher liegen. Oberwasserseite ist die Brüstung des Fußgängerstegs viertelkreisförmig auszubilden, um die Abflusskapazität der Vispa im Falle eines Einstaus zu begünstigen. Die alten Ufermauern sind zudem flussaufwärts entsprechend zu erhöhen.

Im Bauzustand sind Einengungen des Flussbetts nur in den Wintermonaten November bis April und temporäre Stützen im Flussbett nur von Dezember bis Februar erlaubt.

Erdbeben

Die Brücke der Bauwerksklasse II liegt in der schweizweit höchsten Gefährdungszone Z3b und aufgrund des schlechten Baugrunds in der Baugrundklasse E. Wegen der hohen Steifigkeit der Brücke in Längs- und Querrichtung liegen die Schwingzeiten im Bereich der maximalen Werte des Bemessungsspektrums. Demzufolge ist die Anwendung des Ersatzkraftverfahrens angezeigt. Dies ergibt eine beachtliche Erdbeben-Ersatzkraft von 34 Prozent der ständigen Lasten.

Projektbeschrieb

Tragwerk

Da aus Platzgründen zwei weitere, eingleisige Trogbrücken nicht möglich waren, vermochte eine doppelgleisige, wiederum schiefwinklige Trogbrücke in Spannbeton die verschiedenen Anforderungen

the bridge in the longitudinal and transverse directions, the vibration times are within the maximum range of the design spectrum. Consequently, the use of the equivalent force method is appropriate. This results in a considerable earthquake equivalent force of 34% of the permanent loads.

Project description

Structure

Since two additional single-trough bridges were not possible for reasons of space, a double-track trough bridge in prestressed concrete, also with an oblique angle, was the best option to meet the various requirements for use and design. The span width is 54 m. The lateral side beams with a 1.4 m wide upper compression chord have a height of 2.4 to 4.8 m and are therefore about 90 cm higher than the adjacent single-track bridges that are much lighter. The superstructure is fully prestressed in the longitudinal direction under traffic loads. As a result, the cross-section is always under pressure when in use, which has a positive effect not only on fatigue but also on deflection and durability. The prestress complies with corrosion protection category C and consists of a total of 24 electric insulated tendons each with 31 seven-wire 0.6" strands. The anchor heads are electrically connected to a metering box and can therefore be monitored at all times.

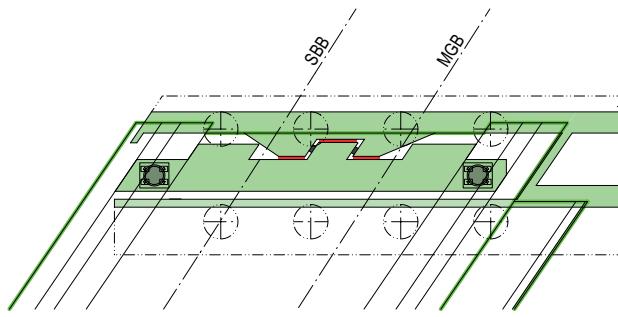


Fig. 4

Anordnung der Lager (Horizontalschnitt), rot: Airex-Schaumplatten.
Arrangement of bearings (horizontal section), red: Airex foam boards.

Bauherr/Owner
Schweizerische Bundesbahnen SBB
Matterhorn Gotthard Bahn (MGBahn)
Bauunternehmung/Contractor
ARGE Vispa:
Frutiger AG (Federführung/lead)
Interalp Bau AG
Verschub/Shifting
ThyssenKrupp Bauservice GmbH
Planer/Planning
Ingenieurgemeinschaft
4. Gleis Visp-St. German:
Diggelmann + Partner AG (Federführung/lead)
B+S AG
Schneider - Bregy und Partner AG

an Nutzung und Gestaltung am ehesten zu erfüllen. Die Spannweite beträgt 54 m. Die seitlichen Längsträger mit einem oberen, 1,4 m breiten Druckgurt weisen eine Höhe von 2,4 – 4,8 m auf und sind damit gegenüber den benachbarten eingleisigen und wesentlich leichteren Brücken rund 90 cm höher.

Der Überbau ist in Längsrichtung unter Verkehrslasten voll vorgespannt. Dadurch ist der Querschnitt im Gebrauchszustand immer überdrückt, was sich nicht nur auf die Ermüdung, sondern auch auf die Durchbiegung und die Dauerhaftigkeit günstig auswirkt. Die Vorspannung erfüllt die Korrosionsschutz-Kategorie C und besteht aus insgesamt 24 elektrisch isolierten Spanngliedern mit je 31 siebendrähtigen 0,6"-Litzen. Die Ankerköpfe sind elektrisch mit einer Messbox verbunden und somit jederzeit kontrollierbar.

Die Aufnahme der beiden Gleise erfordert eine relativ massive, in Querrichtung schlaff bewehrte Betonplatte von max. 65 cm Stärke. Zusammen mit dem auskragenden Gehweg weist der 15,8 m breite, voll ausgerüstete Überbau ein stolzes Gewicht von 2800 t auf, was insbesondere für die Aufnahme der hohen Erdbebenkräfte eine spezielle Lösung erforderte (Fig. 2, 3).

Der Überbau ruht auf vier Topflagern und ist auf einem Widerlager fest und auf dem anderen beweglich gelagert. In Längsrichtung nehmen die Topf-

The mounting of the two tracks requires a relatively solid concrete slab, max. 65 cm thick, with reinforcement in the transverse direction. Together with the cantilevered pathway, the 15.8 m wide, fully equipped superstructure weighs all of 2,800 t, which required a special solution, especially with regard to absorbing high earthquake forces (Fig. 2, 3).

The superstructure rests on four pot bearings and is fixed on one abutment and mounted to be moveable on the other. In a longitudinal direction, the pot bearings only absorb horizontal forces from railway traffic. The forces from earthquakes are transferred to the abutment structure through deformable foam plates (Airex), because standard bearings could not absorb the high impact. In the transverse direction, all horizontal forces are transferred through Lastoblock bearings that are placed between the solid cams of the end cross beams and the correspondingly designed abutment. In the event of an earthquake, the bridge would move longitudinally by a few centimetres but would remain on its bearings (Fig. 4).

Each of the abutments is founded on four large bored piles, max. 25 m long. The accessible abutments contain various supply lines and allow for the maintenance of the bearings at any time.

Equipment

The roadway slab is conventionally sealed with polymer bitumen

lager nur die Horizontalkräfte aus Bahnverkehr auf. Die Kräfte aus Erdbeben werden über deformierbare Schaumplatten (Airex) auf die Widerlagerkonstruktion abgetragen, weil gängige Lager die hohen Einwirkungen nicht aufnehmen könnten. In Querrichtung werden alle Horizontalkräfte über Lastoblock-Lager abgetragen, die zwischen massiven Nocken der Endquerträger und dem entsprechend ausgebildeten Widerlager angeordnet sind. Im Falle eines Erdbebens wird die Brücke längs um wenige Zentimeter verschoben, bleibt aber auf ihren Lagern (Fig. 4).

Die Widerlager sind auf je vier max. 25 m langen Grossbohrpfählen gegründet. Die begehbarer Widerlager enthalten verschiedene Werkleitungen und erlauben jederzeit den Unterhalt der Lager.

Ausrüstung

Die Fahrbahnplatte ist konventionell mit Polymerbitumendichtungsbahnen abgedichtet, die durch eine Gussasphalt-Schicht geschützt sind. Die Entwässerung der quer geneigten Fahrbahnoberfläche erfolgt über vier Einlaufschächte. Wegen limitierter Plat-

Technische Daten

Länge	54,0 m
Breite	15,8 m
Höhe Längsträger	2,8–4,8 m
Dicke Fahrbahnplatte	55–65 cm
Betongewicht ca.	2500 t
Bohrpfähle Ø130 cm	2 x 8 St
Längsvorschub	65 m
Querverschub	3,0 m
Absenkung	0,5 m

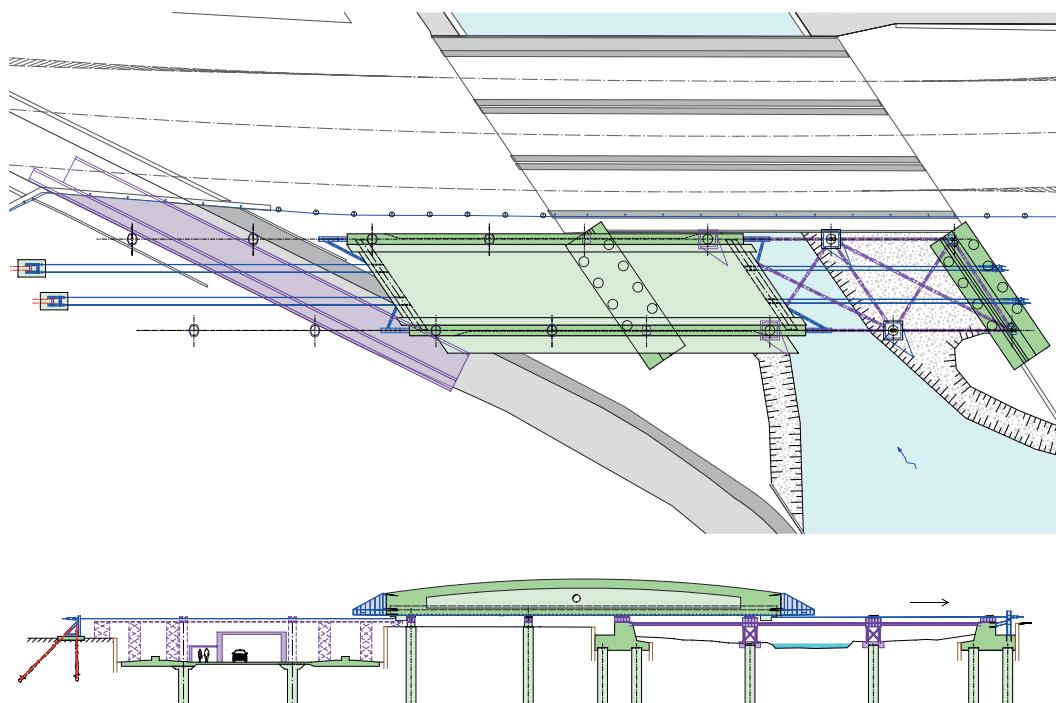


Fig. 5
Längsverschub über die Vispa (Situation und Längsschnitt).
Longitudinal shift over the Vispa river (situation and longitudinal section).

waterproofing sheets that are protected by a mastic asphalt layer. The transverse sloped roadway surface is drained via four inlet shafts. Due to limited slab thickness and insufficient longitudinal gradient, the longitudinal pipeline was attached to the underside of the bridge and can be sheared off during floods. High-maintenance transition joints can be dispensed with by allowing the water to run directly into a drainage pack behind the end of the bridge.

Construction method

Evaluation of the construction method

During the preliminary project it was assumed that the superstructure could be erected conven-

tional on a double-supported, underlying falsework in the river. Due to the restrictions that had, in the meantime, become quite stringent in relation to flooding, the construction work including the erection and dismantling of the falsework would have had to take place within six months over winter, which for a concrete volume of 1000 m³ was considered too risky, in view of winter flooding. Therefore, a number of different versions were examined, that would allow for a longer construction period and fewer flood risks:

Baumethode

Evaluation der Baumethode

Im Vorprojekt wurde davon ausgegan gen, dass der Überbau konventionell auf einem im Fluss zweifach abgestützten, untenliegenden Lehrgerüst würde erstellt werden können. Aufgrund der zwischenzeitlich verschärften Vorgaben betreffend Hochwasser hätte der Bau inklusive Auf- und Abbau des Lehrgerüsts innerhalb sechs Wintermonaten erfolgen müssen, was für ein Betonvolumen von 1000 m³ angesichts möglicher Winterhochwasser als zu riskant beurteilt wurde.

Daher wurden verschiedene Varianten geprüft, die eine längere Bauzeit und geringere Hochwasserrisiken erlauben sollten:

nally on a double-supported, underlying falsework in the river. Due to the restrictions that had, in the meantime, become quite stringent in relation to flooding, the construction work including the erection and dismantling of the falsework would have had to take place within six months over winter, which for a concrete volume of 1000 m³ was considered too risky, in view of winter flooding. Therefore, a number of different versions were examined, that would allow for a longer construction period and fewer flood risks:

- Erect the superstructure at a more elevated position, hanging from an overlying column-free false-work
- Falsework with only one central support in the river
- Steel truss embedded in concrete in the trough walls as a lost falsework
- Erect the superstructure adjacent and shift it into its final position.

It was seen that only the solution of shifting the superstructure would meet the increased demands of the preliminary project

Technical data	
Length	54.0 m
Width	15.8 m
Height longitud. beams	2.8–4.8 m
Thickness bridge deck	55–65 cm
Concrete weight approx.	2500 t
Bored piles Ø130 cm	2 x 8 no.
Longitudinal shift	65 m
Transverse shift	3.0 m
Lowering	0.5 m



Fig. 6
Überbau bereit für den Längsverschub.
Superstructure ready for the longitudinal shift.



Fig. 7
Überbau während des Längsverschubs über die Vispa.
Superstructure during the longitudinal shift over the Vispa river.

- Erstellen des Überbaus in erhöhter Lage, angehängt an einem obenliegenden, stützenfreien Lehrgerüst
- Lehrgerüst mit nur einer Mittelabstützung im Fluss
- In den Trogwänden einbetonierte, mittragendes Stahlfachwerk als verlorenes Lehrgerüst
- Erstellen des Überbaus nebenan und Verschub in die definitive Lage.

Es zeigte sich, dass nur die Verschublösung die gegenüber dem Vorprojekt erhöhten Anforderungen befriedigen kann (Fig. 5). Die übrigen Varianten hätten ein verbleibendes Hochwasserrisiko und/

(Fig. 5). The other solutions would have resulted in a residual flood risk and/or significant design disadvantages.

Construction

In the first winter, the two abutments were erected during low water. The river was channelled at its centre to allow the final and temporary large bored piles to be erected. At the same time, the ground slab for the adjacent road underpass was built.

In the summer, the superstructure was erected on a falsework over the future extension of the road underpass. Protective tunnels were

Kurzfilm zum Brückenverschub/
Short film about the bridge shift
<https://www.dig-ing.ch/referenzen/kunstbauten/#vispa>

oder wesentliche konstruktive Nachteile gehabt.

Bauablauf

Im ersten Winter wurden bei Niedrigwasser die beiden Widerlager erstellt. Für die Ausführung der definitiven und temporären Grossbohrpfähle wurde der Fluss in der Mitte kanalisiert. Gleichzeitig erfolgte der Bau der Bodenplatte der benachbarten Strassenunterführung.

Im Sommer wurde der Überbau auf einem Lehrgerüst über der zukünftigen Erweiterung der Strassenunterführung erstellt. Für die Aufrechterhaltung des Straßenverkehrs wurden Schutztunnel errichtet. Anschliessend wurde der fertig betonierte Betontrog auf 2 mal 4 Verschublager umgesetzt, die auf vorgängig erstellten temporären Bohrpfählen ruhten (Fig. 6).

Im zweiten Winter erfolgte zuerst der Längsverschub über die Vispa. Kurze Vorbauschäfte an den Brückenenden halfen die Beanspruchung des 2500 t schweren Überbaus zu reduzieren und das Auffahren auf die jeweiligen Verschublager auf den temporären Flussstützen zu erleichtern. Dabei musste der Unternehmer die vorgesehenen, starren Taktziebelager durch Verschublager auf Pressen ersetzen, weil der sehr steife Überbau infolge Bautoleranzen und elastischer Einfederung der Hilfsstützen grosse Lasten anzu-

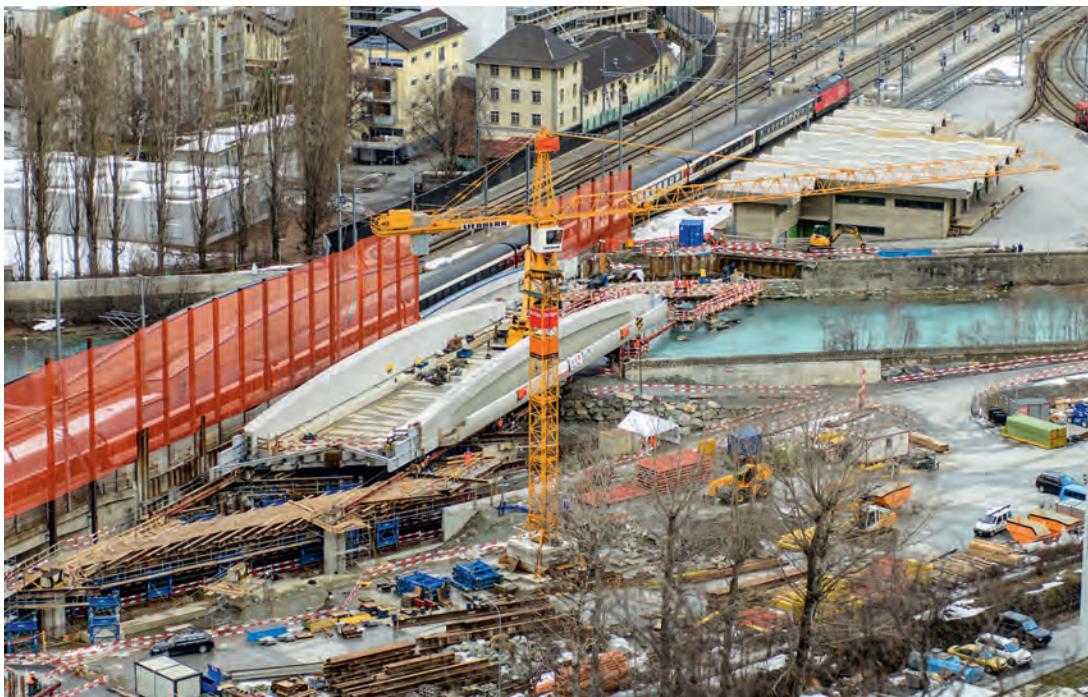


Fig. 8

Überbau kurz vor dem Ziel (im Vordergrund Reste des Lehrgerüsts).

Superstructure just before the finish line (in the foreground, remains of the falsework).

erected in order to maintain road traffic. Subsequently, the prefabricated concrete trough was moved to 2 by 4 sliding bearings that were placed on previously erected, temporary bored piles (Fig. 6).

In the second winter, the longitudinal shift over the Vispa river was carried out. Short launching noses at each end of the bridge helped to reduce the load on the 2500 t heavy superstructure and to facilitate access to each sliding bearing on the temporary river supports. The contractor had to replace the planned rigid incremental launching bearings with sliding bearings on presses, because the very rigid superstructure threatened to attract heavy loads due to design tolerances and elastic deflection of the auxiliary supports and would therefore have been overstrained. The longitudinal displacement over 65 m was carried out without a problem within five days, as planned (Fig. 7, 8).

After the longitudinal displacement, the bridge trough was prestressed in order to adjust the final load-bearing effect as a simple beam and to be able to

ziehen drohte und dadurch überbeansprucht worden wäre. Der Längsverschub über 65 m konnte wie geplant innert fünf Tagen pannenfrei abgewickelt werden (Fig. 7, 8).

Nach dem Längsverschub wurde der Brückentrog vorgespannt, um die definitive Tragwirkung als einfacher Balken einzustellen und die temporären Flussstützen auszubauen zu können. Nach dem Umsetzen auf Verschubbahnen erfolgte der Querverschub um rund 3 m bis knapp an die bestehende Brücke. Als Letztes wurde der Überbau auf die definitiven Lager abgesenkt und die Widerlager und Brückenenden wurden vervollständigt.

Nachwort

Der Bau der Vispabrücke mit einem an und für sich einfachen Tragsystem zeigt, dass Randbedingungen die Baumethode und allenfalls auch den Endzustand wesentlich beeinflussen können. Einer frühzeitigen, gesicherten Abklärung insbesondere von äusseren, nicht beeinflussbaren Umständen wie engen Platzverhältnissen oder Hochwasserrisiken kommt daher eine fundamentale Bedeutung zu.

remove the temporary river supports. After the transfer on sliding tracks, the transverse displacement of approx. 3 m to the existing bridge was carried out. As a last step, the superstructure was lowered onto the final bearings and the abutments and bridge ends were completed.

Postscript

The construction of the Vispa bridge with its relatively simple load-bearing system shows that the parameters can considerably influence the construction method not to mention the final state of the structure. Early and reliable clarification, in particular of external circumstances that are not within our control, such as tight space conditions or flood risk, is therefore of fundamental importance.

Autor/Author

Martin Diggelmann
dipl. Bauing. ETH
Diggelmann + Partner AG
CH-3013 Bern
m.diggelmann@dig-ing.ch

Neue Strassenbrücke über den Unterwasserkanal in Dietikon

New road bridge over the tailrace channel in Dietikon

Ivan Markovic, Roger Manetsch

Einleitung

Der in Dietikon gelegene Werkhof der Elektrizitätswerke des Kantons Zürich (EKZ) befindet sich auf einer Insel in der Limmat. Zwei Brücken ermöglichen die Nutzung des Areals: eine über die Limmat und den Oberwasserkanal für den Strassenverkehr und die andere über den Unterwasserkanal, die hauptsächlich für Transportfahrzeuge der EKZ und andere Lieferdienste genutzt wird sowie zahlreiche wichtige Werkleitungen trägt.

Infolge des Ausbaus des neuen Wohnquartiers «Limmatfeld» auf der Gegenseite des Unterwasserkanals in Dietikon wurde eine neue, rund 40 m lange Strassenbrücke als Verbindung zwischen dem EKZ-Werkhof und der Stadt Dietikon errichtet. Die Brücke wird hauptsächlich von den EKZ-Transportfahrzeugen sowie für mehrere Elektro- und Telekommunikationsleitungen genutzt. Bei der Bauausführung gelangte ein innovatives Verfahren zum Einsatz. Statt den Überbau auf einem konventionellen Lehrgerüst zu erstellen, dienten zwei vorfabrizierte und vorgespannte Längsträger der Brücke als Lehrgerüst

Introduction

The road maintenance depot of the energy utility company, Elektrizitätswerke des Kantons Zürich (EKZ), is on an island in the river Limmat. Two bridges facilitate the use of the complex: one for road traffic over the Limmat and the headrace channel and the other over the tailrace channel that is used primarily for EKZ transport vehicles and other delivery services as well as for numerous important cables.

Due to the development of the new residential district "Limmatfeld" at the other side of the tailrace channel in Dietikon, a new road bridge, approx. 40 m in length, was erected to connect the EKZ depot and the town of Dietikon. The bridge is used mainly by EKZ transport vehicles and for many electric and telecommunication lines.

An innovative procedure was used for the execution. Instead of constructing the superstructure with a conventional falsework, two pre-fabricated and prestressed longitudinal beams of the bridge served as a falsework for the bridge deck. The approx. 240 t heavy main beams were shifted

der Fahrbahnplatte. Die rund 240 Tonnen schweren Hauptträger wurden mit dem grössten Raupenkran der Schweiz versetzt. Die neue Brücke ist ein statisch effizientes, kostengünstiges, dauerhaftes und ästhetisch gut in die Umgebung passendes Bauwerk.

Randbedingungen für Projektierung und Tragwerkskonzept

Die kantonale Wasserschutzbehörde definierte zwei wichtige Randbedingungen für die Projektierung der Brücke: Es sind keine Abstützungen im Unterwasserkanal erlaubt (weder im definitiven noch im Bauzustand) und ein minimales Freibord (wird aufgrund der hydraulischen Berechnungen des Unterwasserkanals ermittelt) muss eingehalten werden. Die einzige Randbedingung seitens Bauherrschaft EKZ war, dass die Brücke für ihre Schwertransportfahrzeuge (Fahrzeuge, die grosse Generatoren und Batterien für Trafostationen transportieren) befahrbar ist. Die wichtigste Bedingung aus geotechnischer Sicht war, dass die Brücke tief gegründet werden muss (auf Bohrpfählen).

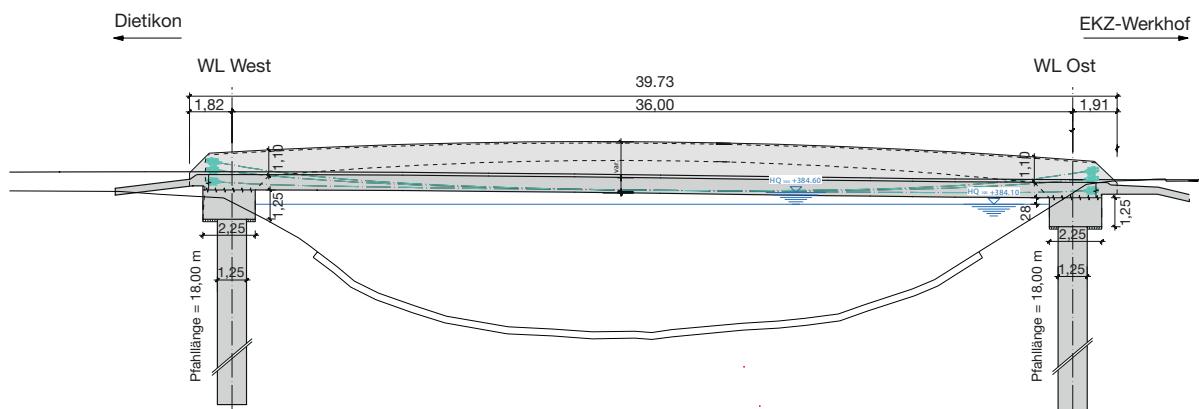


Fig. 1
Längsschnitt der Brücke.
Longitudinal section of the bridge.

by the largest crawler crane in Switzerland. The new bridge is a structurally efficient, cost-effective, enduring structure that blends well aesthetically into its surroundings.

Die Autoren widmen diesen Beitrag Andre Bättig (1966–2016), Bauingenieur und Militärpilot, der an der Projektierung und Ausführung dieser Brücke wesentlich beteiligt war.

The authors have dedicated this article to Andre Bättig (1966–2016), civil engineer and military pilot who played a significant role in the design and execution of this bridge.

Parameters for design and structural concept

The cantonal water authority specified two important parameters for the design of the bridge: Supports are not permitted in the tailrace channel (either in the final state nor during construction) and a minimum freeboard (determined based on the hydraulic calculations of the tailrace channel) has to be maintained. The only stipulation on the part of the client EKZ was that the bridge had to be accessible for heavy transport vehicles (vehicles that transport large generators and batteries for substations). The most important requirement from a geotechnical point of view was that the bridge had to have a deep foundation (bored piles).

Based on these parameters, as regards the structure, the bridge had to be designed either as a simple beam structure on piles or a rigid-frame structure comprising a superstructure (frame bars) and substructure (piles and pile base). A rigid-frame structure allowed for the creation of a monolithic structure that would be low-maintenance and permanent once the design and execution were correct and concise.

Aus diesen Randbedingungen folgte, dass die Brücke im statischen Sinne entweder als ein auf Pfählen gestützter einfacher Balken oder als ein Rahmentragwerk, bestehend aus Überbau (Rahmenriegel) und Unterbau (Pfähle und Pfahlbankette), konzipiert werden konnte. Ein Rahmentragwerk ermöglicht die Erstellung eines monolithischen Bauwerks, das bei korrekter und sauberer Projektierung und Ausführung unterhaltsarm und dauerhaft ist. Daher wurde entschieden, diese Lösung weiterzuverfolgen. Aus der Bedingung für das Freibord und der Höhenlage der beiden Ufer ergibt sich, dass die tragende Konstruktion der Brücke sich oberhalb der Fahrbahn befinden muss.

Überbau

Die neue Brücke wurde als monolithisches Rahmentragwerk mit Riegeln aus vorgespanntem Beton projektiert. Der Überbau (Rahmenriegel) weist einen Trogquerschnitt auf und wird auf den Bohrpfählen fundiert. Massive Pfahlriegel verbinden Überbau und Pfähle. Die Tragkonstruktion der neuen Brücke entspricht daher in statischem Sinne einem

Therefore, the decision was made to pursue this solution. The conditions relating to the freeboard and the elevation of the two banks meant that the supporting structure had to be above the roadway.

Superstructure

The new bridge was designed as a monolithic rigid-frame structure with beams made of prestressed concrete. The superstructure (frame beam) has a trough cross-section and is founded on solid bored piles. The superstructure and piles are connected with massive pile caps. In a structural sense, therefore, the structure of the new bridge corresponds to a frame with rigid bars and soft columns (Fig. 1).

The total length of the bridge is 39.7 m (without transition slabs), the structural span of the bridge (distance between pile axes) is 36 m and the section height varies from 2.2 m at the centre of the bridge to 1.6 m at the bridge end. The upper edge of the superstructure is arched. The bridge is founded on each side on three 18 m long bored piles with a diameter of 118 m.

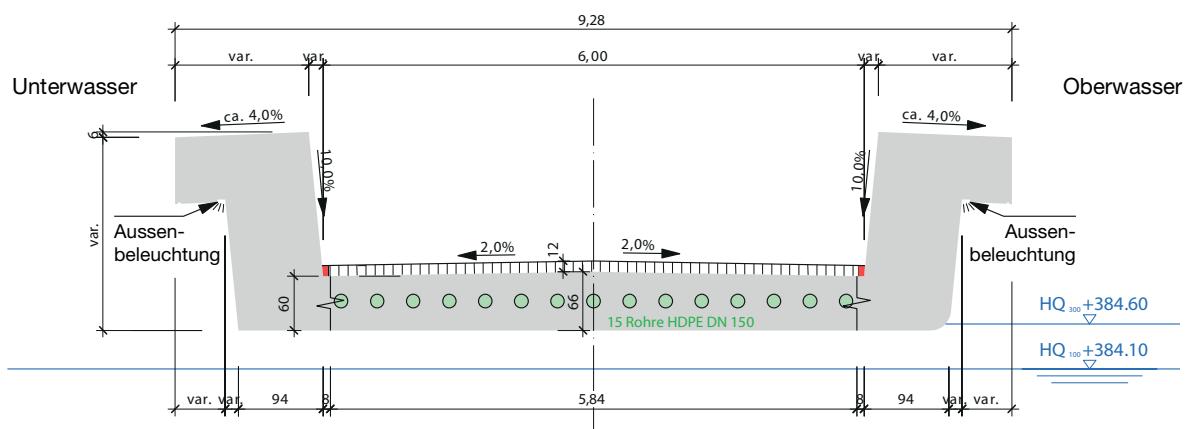


Fig. 2

Normalquerschnitt der Brücke.
Normal cross-section of the bridge.



Fig. 3
Vorfabrizierte Längsträger vor dem Betonieren.
Pre-fabricated longitudinal beams prior to concreting.

Rahmen mit steifen Riegeln und weichen Stützen (Fig. 1).

Die Gesamtlänge der Brücke beträgt ca. 39,7 m (ohne Schleppplatten), die statische Spannweite der Brücke (Abstand der Pfahlachsen) 36 m und die Querschnittshöhe variiert von 2,2 m in Brückenmitte bis 1,6 m am Brückenende. Die obere Kante des Überbaus weist eine Bogenform auf. Die Brücke ist beidseits auf je drei 18 m langen Bohrpfählen mit Durchmesser 118 cm fundiert.

Das 100-jährliche Rückstau-Hochwasser (HQ_{100}) befindet sich auf der Kote 384,10 m, sodass das Freibord zum HQ_{100} rund 0,28 m beträgt, was die Bedingung der hydraulischen Berechnung des Unterwasserkanals erfüllt. Wichtig zu erwähnen ist, dass das übliche Freibord von 1 m in diesem Fall nicht massgebend ist, weil sich auf der Oberwasserseite in der Nähe der Brücke ein Elektrizitätskraftwerk der EKZ befindet, das die Hochwasserkote regulieren kann. Außerdem können keine grossen Gegenstände (Baumstämme o.ä.) das Kraftwerk durchfließen.

Die Breite der Fahrbahn beträgt 6 m und bietet somit Platz für zwei Fahrspuren von je 3 m. Die

The 100-year back water flood (HQ_{100}) is at spot height 384.10 m. Therefore, the freeboard for HQ_{100} is approx. 0.28 m, which meets the requirement relating to the hydraulic calculation of the tailrace channel. It is important to mention that the usual freeboard of 1 m is not decisive in this case due to the fact that there is an EKZ power plant on the headrace side near the bridge that can regulate the flood spot height. In addition, large objects (tree trunks or similar) cannot flow through the power plant.

The roadway is 6 m wide, therefore, providing space for two lanes of 3 m each. The bridge deck has a pitch of 2% and is 60 cm high at each end and 66 cm in the centre. A total of 15 HDPE pipes with a diameter of 150 mm were installed approx. in the middle level of the bridge deck. These pipes may only be used for electric and telecommunications lines (Fig. 2). The webs are used to transfer the loads from the bridge deck towards the abutments and/or the piles. The webs are inclined towards the outside and have a negative ratio of 1:10. The lower part of the web is approx. 0.95 m wide and the upper part approx. 1.50 m.

Fahrbahnplatte weist ein Dachgefälle von 2% auf; ihre Höhe beträgt an beiden Enden 60 cm und in der Mitte 66 cm. In der Fahrbahnplatte, etwa in deren mittleren Ebene, wurden insgesamt 15 HDPE-Rohre mit einem Durchmesser von 150 mm eingebaut. Durch diese Rohre dürfen ausschliesslich Elektro- und Telekommunikationswerkleitungen geführt werden (Fig. 2).

Die Stege dienen zur Übertragung der Lasten aus der Fahrbahnplatte in Richtung der Auflager bzw. der Pfähle. Die Stege sind nach aussen geneigt und haben einen Anzug von 1:10. Die Stegbreite beträgt rund 0,95 m im unteren und 1,50 m im oberen Teil. Die Ausbildung des Querschnitts mit einem breiten oberen Teil ergab sich vor allem aus statischen Gründen, um die Bedingung für die maximale Höhe der Druckzone bei der vorwiegend auf Biegung beanspruchten Zone in Brückenmitte zu erfüllen, sie erzielt aber auch einen ästhetischen Effekt. Unterhalb der Verbreiterung des oberen Stegteils ist in einem Kanal die LED-Beleuchtung des Bauwerks eingelassen. Nicht nur die gesamte Steghöhe, sondern auch die Höhe des oberen

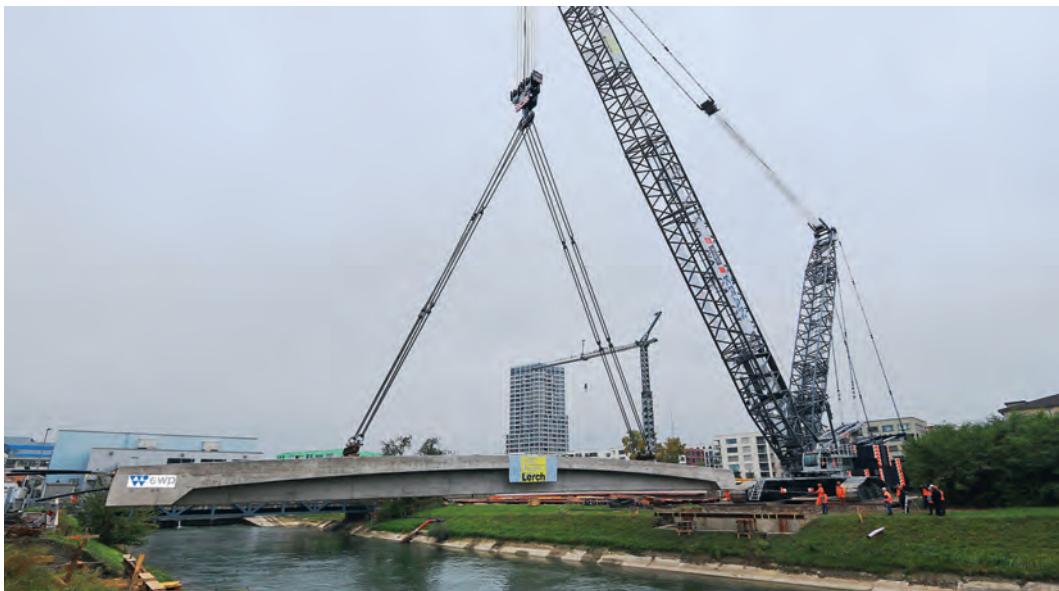


Fig. 4

Versetzen des ersten vorfabrizierten und teilweise vorgespannten Längsträgers,
Gewicht: 240 Tonnen, max. Tragvermögen des Raupenkrans: 750 Tonnen.

Shifting the first pre-fabricated and partially prestressed longitudinal beam,
weight: 240 t, max. capacity of the crawler crane: 750 t.

The design of the section with a wide upper part arose mainly for structural reasons, to meet the maximum height requirement of the compression zone for the area at the centre of the bridge that is subject mainly to bending. However, it also works aesthetically. The LED lighting for the structure is set into a channel beneath the widened upper web part. It is not only the entire web height but also the height of the upper part of the web that varies for aesthetic reasons: It is 1.4 m at each end, narrowing to 0.8 m at the centre of the bridge.

The prestressing comprises 6 cables in total with 22 strands (steel quality Y1860) incl. anchors. The tendons run through the webs, have their lowest point at the centre of the span and are anchored at both ends of the bridge. The cables were tensioned on both sides. In the longitudinal direction, the course of the road comprises a crest with a vertical radius of 1500 m and the high point on the western abutment, and a trough with a radius of 100 m and the lowest point above the eastern abutment. Therefore, the bridge drains both with a pitch of 2% transversely and also with a

Teils des Stegs variiert aus ästhetischen Gründen: Sie beträgt an den Enden rund 1,4 m und verjüngt sich bis zur Brückenmitte auf 0,8 m.

Die Vorspannung besteht aus insgesamt 6 Kabeln mit 22 Litzen (Stahlqualität Y1860) inkl. Verankerungen. Die Vorspannkabel verlaufen durch die Stege, haben den Tiefpunkt in der Mitte der Spannweite und sind an beiden Brückenenden verankert. Die Kabel wurden beidseits gespannt. In Längsrichtung besteht der Strassenverlauf aus einer Kuppe mit einem vertikalen Radius von 1500 m und dem Hochpunkt auf dem Widerlager West sowie aus einer Wanne mit einem Radius von 100 m und dem Tiefpunkt über dem Widerlager Ost. Die Brücke entwässert sich somit sowohl mit einem Dachgefälle von je 2% in Querrichtung als auch mit einem Längsgefälle von 1,4%. Die Einlaufschächte befinden sich außerhalb der Brücke gerade hinter dem Widerlager Ost (auf dem Werkhofplatz).

Da die Brücke relativ kurz und wenig befahren ist, wurden keine Fahrbahnübergänge vorgesehen. Es wurde nur im Belag eine elastische Fuge eingebracht.

longitudinal pitch of 1.4%. The inlet shafts are outside of the bridge, just behind the eastern abutment (at the depot).

As the bridge is relatively short and there is not much traffic on it, no transition joints were planned. An elastic joint was placed only in the surface.

Substructure

The bridge substructure comprises a solid transverse beam and three bored piles at each bank. The transverse beams introduce the loads from the bridge superstructure into the piles. The introduction of force was simulated in a simplified manner with several 3D framework models.

The bored piles are primarily loaded for pressure and bending in the upper parts and therefore require relatively strong reinforcement in the longitudinal direc-

Bauherr/Owner

Elektrizitätswerke des Kantons Zürich
(EKZ)

Projekt- und Bauleitung/

Project and site management

Ingenieurbüro ewp AG Effretikon

Bauausführung/Execution
Lerch AG Bauunternehmung,
Winterthur

Unterbau

Der Brückenunterbau besteht an beiden Ufern aus je einem massiven Querträger und drei Bohrpählen. Die Querträger leiten die Beanspruchungen aus dem Brückenüberbau in die Pfähle ein. Die Krafteinleitung wurde vereinfacht mit mehreren 3-D-Fachwerkmodellen analysiert.

Die Bohrpfähle sind vor allem in den oberen Teilen auf Druck und Biegung belastet und benötigten daher eine relativ starke Bewehrung in Längsrichtung. Beim Projektieren war diese Bewehrung so zu wählen, dass sich möglichst wenige Konflikte mit der Bewehrung der beiden Querträger ergaben.

Bauausführung

Die Projektierung der Brücke sah die Erstellung des Brückenüberbaus mit einem sogenannt obenliegenden Lehrgerüst vor. Die Bauunternehmung schlug zusätzlich eine Lösung mit zwei vorfabrizierten und teilweise vorgespannten Längsträgern (als Stege des zukünftigen Trogquerschnitts der Brücke) vor, die im Bauzu-

tion. At the design stage, the chosen reinforcement had to result in as little conflict as possible with the reinforcement of the two transverse beams.

Construction

The planning for the bridge provided for the erection of the superstructure with an overlying falsework. In addition, the contractor suggested a solution with two pre-fabricated and partially prestressed longitudinal beams (as webs for the future trough section of the bridge), which were to assume the function of a falsework for the bridge deck during construction. The client chose this solution with pre-fabricated longitudinal beams.

Shifting the pre-fabricated longitudinal beams

Due to the pre-production of the webs on site (Fig. 3), it was possible to dispense with an overlying falsework. The beams were shifted onto the bored piles created in advance and were therefore used during construction to mount the formwork for the bridge deck. In

stand die Rolle des Lehrgerüsts für die Fahrbahnplatte übernehmen sollten. Die Bauherrschaft entschied sich für diese Lösung mit vorfabrizierten Längsträgern.

Versetzen der vorproduzierten Längsträger

Durch die Vorproduktion der Stege vor Ort (Fig. 3) konnte auf ein obenliegendes Lehrgerüst verzichtet werden. Die Träger wurden auf die vorgängig erstellten Bohrpfähle versetzt und konnten so bereits während der Bauzeit zur Aufhängung der Schalung für die Fahrbahnplatte verwendet werden. Der Längsträger durfte dabei aus Beanspruchungsgründen nicht vollständig, sondern nur teilweise vorgespannt werden. Höhepunkt des Baus der Brücke stellte das Versetzen der je 240 Tonnen schweren Längsträger mit dem grössten Raupenkran der Schweiz (Fig. 4 und 5). Der Bauvorgang machte die Ausbildung des Tragwerks als Rahmen jedoch zu einem technischen Knackpunkt, sowohl in der Projektierung als auch in der Ausführung. Das Rahmeneck musste



Fig. 5

Versetzen des zweiten vorfabrizierten und teilweise vorgespannten Längsträgers.
Shifting the second pre-fabricated and partially prestressed longitudinal beam.



Fig. 6
Vollendetes Bauwerk.
Completed structure.

order to limit the strains, the longitudinal beams could not be fully but only partially prestressed. The highlight in the construction of the bridge involved shifting the longitudinal beams, each 240 t in weight, using the largest crawler crane in Switzerland (Fig. 4 and 5). However, the design of the structure became a sticking point, both for project planning and execution, due to the construction process. The frame corner had to be connected to the shifted beams in cramped conditions with a screw reinforcement.

Aesthetic thoughts

The arched shape of the superstructure characterises the appearance of the bridge (Fig. 6). The arch connects with the road and the terrain at the bank, therefore, creating a natural unit with its surroundings. At the same time, the outer surfaces of the web and the side area of the pile cap create one level. The bridge form achieves an additional dynamic due to the inclined webs and also from the fact that they are wider in the upper part. Furthermore, the webs inclined towards the

under beingten Verhältnissen mit einer Schraubarmierung an die versetzten Träger angeschlossen werden.

Ästhetische Gedanken

Die Bogenform des Überbaus prägt das Erscheinungsbild der Brücke (Fig. 6). Der Bogen schliesst an die Strasse und das Terrain am Ufer an und bildet somit eine natürliche Einheit mit der Umgebung. Dabei formen die Außenfläche des Stegs und die seitliche Fläche des Pfahlriegels eine Ebene. Eine zusätzliche Dynamik erreicht die Brückenform durch die geneigten Stege sowie durch deren Verbreiterung im oberen Teil. Die nach aussen geneigten Stege vermitteln zudem ein Gefühl von Breite und Komfort beim Befahren bzw. Begehen der Brücke. Die Beleuchtung auf der Aussenseite der Stege unterstreicht das Erscheinungsbild der Brücke zusätzlich. Es ist dabei interessant zu erwähnen, dass bei der Formgebung der Brücke aus zeitlichen Gründen kein Architekt mitwirkte, sondern dass sie ausschliesslich das Resultat der Arbeit der beteiligten Bauingenieure ist.

outside give a sense of width and comfort when driving or walking over the bridge. The appearance of the bridge is highlighted in addition by the lighting on the outside of the webs. It is interesting to mention that for reasons of time, an architect was not involved in the design of the bridge, but that it was the result of the work of the civil engineers involved.

Autoren/Authors

Ivan Markovic
Prof. Dr. dipl. Bauing. TU/SIA
HSR Hochschule für Technik
Rapperswil
(zur Zeit der Projektierung und
Erstellung beschäftigt als Projektleiter
bei ewp AG/at the time of design and
execution, project leader at ewp AG)
ivan.markovic@hsr.ch

Roger Manetsch
eidg. dipl. Baumeister, Bauführer,
stv. Bereichsleiter Ingenieurbau
Lerch AG Bauunternehmung, CH-
8404 Winterthur
r.manetsch@lerch.ch

Pont du Tiguelet

The Tiguelet bridge

Samuel Hörmann, Martin Bimschas, Balz Amrein, Walter Kaufmann, Beat Meier, Raoul Spataro

Introduction

Dans le cadre des aménagements de la gare de Givisiez dans le canton de Fribourg, le passage à niveau CFF de la route de Belfaux situé peu avant la gare devait être supprimé en réalisant un évitemenent routier dans la zone industrielle en développement. Le tracé de cette nouvelle route nécessitait d'un nouveau pont qui enjambe les deux voies des lignes Fribourg–Payerne et Fribourg–Morat, les quatre voies de rangement menant au futur dépôt des Transports publics Fribourgeois (tpf), ainsi qu'une dépression caractérisée par une zone marécageuse. Le Service des ponts et chaussées du canton de Fribourg lança en 2014 un concours de projet pour la construction du Pont du Tiguelet qui a été remporté par le projet LOTUS.

Contraintes principales

Le pont accueille deux voies de circulations, deux bandes cyclables et un trottoir, ce qui a pour résultat une section standard d'une largeur totale de 11,80 m, bordures incluses. Auprès de la culée nord, le raccordement à la route cantonale existante nécessite un élargissement important en

Introduction

As part of the modifications to be carried out at the Givisiez railway station in the Canton of Fribourg, the adjacent railway crossing on the cantonal road was to be removed and replaced with a bridge approx. 600 m further away. This modified route required a new section of road that would pass over the two existing tracks on the railway line from Fribourg to Payerne and Fribourg to Morat, over four new planned tracks for the future depot at the Fribourg transport company TPF and over wetland. This provided the basic brief for the project competition launched in 2014 by the Civil Engineering Department of the Canton Fribourg. The winning project was the LOTUS project described below.

Key parameters

In addition to the two traffic lanes, each with a cycle path on the side, the bridge also includes a pedestrian walkway on one side of the deck resulting in a standard cross-section with a total width of 11.80 m, including the edge beams. The T-junction connection between the bridge and the existing cantonal road direct-

forme de trompette. D'autre part, une hauteur de construction maximale de seulement 1,50 m est disponible pour le franchissement des voies en raison du gabarit des CFF compte tenu du raccordement à la route existante et des rayons d'arrondissement verticaux du profil longitudinal. Le franchissement fortement oblique des lignes des chemins de fer est déterminant pour le choix de la disposition des piles. Le sol de fondation est constitué par du rocher molassique présent relativement près de la surface dans la zone nord, mais par contre recouvert plus au sud de formations fluvio-glacières d'une épaisseur jusqu'à 20 m avec présence de matériaux compressibles (dépôts palustres et lacustres).

Conception générale de l'ouvrage

La combinaison entre les contraintes principales des voies ferrées et la situation topographique caractérisée par une grande dépression ont été à la base du projet lauréat, à savoir un pont en béton précontraint de neuf travées, long d'environ 290 m avec des portées de 24,80 m à 34,90 m. La superstructure est constituée d'un tablier à section en T avec des porte-à-faux de la dalle de roulement relativement importants de sorte que les points d'appui sont toujours à l'ombre du tablier et que le pont apparaisse élancé malgré sa largeur et la faible hauteur par rapport au terrain.

Au nord, une transition douce entre le pont et le talus a été atteinte grâce à une culée basse disposée parallèlement au talus. En raison de l'orientation particulièrement oblique du talus par rapport à l'axe du pont et de l'élargissement nécessaire dans la zone de l'extrémité nord, il résulte

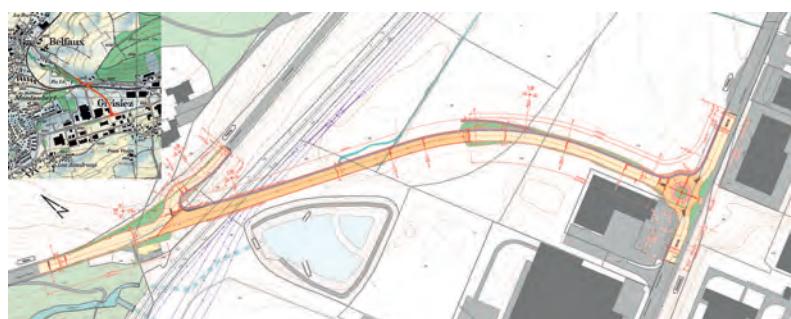


Fig. 1

Tracé aménagé de la route cantonale Belfaux–Givisiez.
Reproduit avec l'autorisation de swisstopo (JA110138).
Adjusted alignment cantonal road Belfaux to Givisiez.
Reproduced by permission of swisstopo (JA110138).

ly behind the north abutment requires, on the one hand, a trumpet-like widening of the end of the bridge. On the other hand, this restricts the maximum static depth over the tracks to 1.50 m due to the requirements of the vertical radii of transition curves in the road alignment.

The tracks to be crossed cut through the axis of the new bridge at a skew and were the governing parameter when arranging the substructure elements. The foundation soil on the project site consists of stable molasse rock lying relatively close to the surface in the northern part of the site. Further south the molasse rock is covered with up to 20 m of loose rock including lake sediment with poor bearing capacity and susceptible to settlement.

Concept and design

Based on this combination of constraints with regard to the tracks and the extensive topographical depression, the competition team conceived a 9-span girder bridge with a prestressed concrete superstructure. The total length of the bridge is about 290 m, featuring span widths between 24.80 m and 34.90 m. The superstructure is designed as a T-beam cross-section with relatively large cantilevers such that the supports are always in the shadow of the girders and the bridge has a slender appearance despite its width and general low height over ground.

At the northern end, a gentle transition is achieved from the bridge to the natural embankment by means of the low abutment aligned with the embankment. The very oblique course of the embankment, compared with the bridge axis, and the necessary widening of the northern end of the bridge for the road junction, have produced an abutment over 30 m in width that nonetheless is clean and simple due to its integral design as a concrete wall monolithically connected to the superstructure. Further to the south, the bridge sits on eight elliptical piers with gradually



Fig. 2
Vue de la culée nord vers le sud.
View from the north abutment towards the south.



Fig. 3
Visualisation, vue en direction de la culée nord.
Visualisation, view towards the northern abutment.

te une culée de plus de 30 m de large, cependant avec un aspect simple par sa construction intégrale comme paroi en béton reliée monolithiquement à la superstructure. Par la suite, en direction sud, le pont s'appuie sur huit piles elliptiques dont les premières reprennent l'orientation oblique de la culée. Ainsi, en même temps, une disposition optimale des piles entre les voies et à côté des voies obliques est possible. Par ailleurs, dans cette zone la largeur des piles est variable dans la direction transversale du pont, en accord avec l'élargissement du tablier. Grâce à la forme elliptique, les piles confèrent une unité à l'ensemble de

varying alignment in the ground plan, thus accommodating the skew of the abutment and the direction of the tracks. At the same time, this allows for the optimum layout of the piers between and adjacent to the tracks crossing below the bridge. Furthermore, these piers are characterised by varying dimensions in the transverse direction of the bridge, which match the widening of the superstructure. Despite their varying skew and widths, the elliptical shape of the piers creates an impression of unity along the entire length of the structure.

Given the considerable length of the bridge, the southern abut-

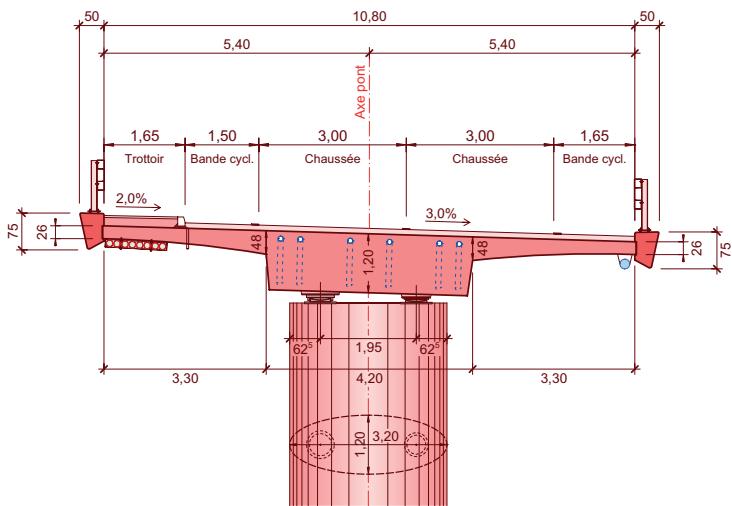


Fig. 4
Section standard sur le pilier avec appuis sphériques.
Standard cross-section over support with spherical bearings.

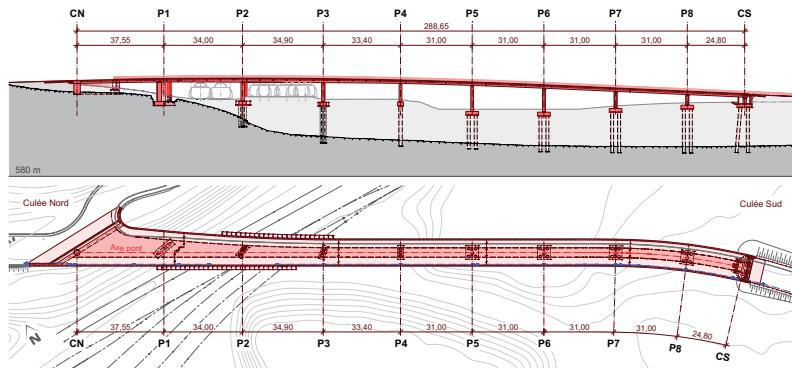


Fig. 5
Coupe longitudinale et plan.
Longitudinal section and ground plan.

l'ouvrage malgré la variation de l'orientation et de la largeur.

La culée sud, où en raison de la longueur du pont des appareils d'appui mobiles et un joint de chaussée à quatre ouvertures s'avèrent nécessaires, s'intègre avec harmonie dans le remblayage servant de prolongation du pont grâce au choix d'un plan trapézoïdal de sa chambre de visite.

Concept de la structure

Superstructure

Le tablier, conçu en poutre en T, présente une largeur totale sans bordures de 10,80 m dans la section standard. Il se compose d'une âme large 4,20 m, d'une hauteur de 1,20 m et de deux porte-à-faux de 3,30 m chacun en forme de

ment is equipped with bearings that facilitate longitudinal movement as well as a 4-cell modular expansion joint. The abutment blends harmoniously into the embankment, which appears as an extension of the bridge thanks to the use of a trapezoidal ground plan of the abutment, incorporating the maintenance chamber providing access to the expansion joint and the bearings.

Structural concept

Superstructure

The T-beam bridge girder has a 10.80 m wide standard cross-section, excluding the parapets. The deck consists of a 4.20 m wide, 1.20 m deep web and two tapered cantilevers of 3.30 m, each

voute, avec une épaisseur de 0,48 m dans la connexion à l'âme. Dans les plus grandes portées au-dessus des voies ferrées, la hauteur du tablier augmente continuellement de 1,20 m à 1,50 m au maximum, il en résulte donc des élancements entre $\frac{1}{24}$ et $\frac{1}{26}$. Dans la zone de l'extrême nord, la poutre du pont s'élargit de manière continue vers la culée Bel-faux, en fonction de la géométrie de la route, alors que les porte-à-faux de la dalle de roulement restent constants.

Le tablier est précontraint dans la section standard au moyen de quatre câbles de 27 torons Ø 0,6" ($P_0 = 5273$ kN) et de deux câbles de 22 torons Ø 0,6" ($P_0 = 4297$ kN). Dans la zone des sections plus hautes et plus larges, cette précontrainte est complétée par jusqu'à six unités complémentaires de 22 torons Ø 0,6" ($P_0 = 4297$ kN). Pour des raisons de durabilité et de résistance à la fatigue, les câbles ne sont pas tous couplés dans le même arrêt de bétonnage, au moins deux câbles passent à travers et sont ancrés dans l'étape suivante. Aucun recouvrement des unités de précontrainte a été prévu au-dessus des piles ce qui permet de limiter la hauteur de la zone comprimée à l'état-limite ultime à une valeur garantissant un comportement ductile de la section. Une précontrainte totale

Maitre d'ouvrage/Owner
Service des ponts et chaussées de l'Etat de Fribourg
Projet et direction technique des travaux/Project and technical site management
dsp Ingenieure + Planer AG, Greifensee/Uster
Spataro Petoud Partner SA, Bellinzona
Architecte/Architect
Balz Amrein/Architektur/Brückenbau, Zurich
Direction locale des travaux/Local site management
IUB Engineering SA, Givisiez
Exécution des travaux/Contractors
Routes Modernes SA, Fribourg
(à partir de 2018: Antiglio SA, Fribourg)

Coûts (uniquement le pont)/Construction costs (bridge only)
env. CHF 11,4 millions/
approx. CHF 11.4 million

with a depth of 0.48 m where the cantilevers connect to the web. For the largest spans over the railway tracks, the girder depth increases continuously from 1.20 m to a maximum of 1.50 m. With the exception of the southern end span, this produces slenderness ratios between $\frac{1}{24}$ and $\frac{1}{26}$ for the bridge girder. For the widening of the superstructure at the northern end of the bridge, the total width and web width increase by the same dimension, while the lengths of the cantilevers remain constant.

Post-tensioning of the standard cross-section is achieved with four 27-strand tendons $\varnothing 0.6"$ ($P_0 = 5273$ kN) and two 22-strand tendons $\varnothing 0.6"$ ($P_0 = 4297$ kN). In the area of the deeper and wider cross-sections, the post-tensioning is supplemented by up to six additional 22-strand tendons $\varnothing 0.6"$ ($P_0 = 4297$ kN). In order to avoid potential weak points with regard to durability and fatigue, not all tendons are coupled in the same construction joint, that is, at least two tendons are continued and either anchored or coupled at the next concreting stage. Overlapping of the post-tensioning tendons over the piers is avoided in order to limit the concrete compression zone depth in the ultimate limit state to a degree that ensures ductile load-bearing behaviour. Given that the selected cross-section and the tendon profiles result in relatively large positive secondary moments, full prestressing is nonetheless ensured for permanent loads.

Substructure

With the aim of creating a structure that requires as little maintenance as possible, as is the case with the north abutment, the northernmost four piers were also connected monolithically to the superstructure, which also has a favourable effect on the transfer of loads resulting from train impact. In addition, the well-known constructive problems that arise from the use of bearings and expansion joints for skewed bridge ends could be avoided,

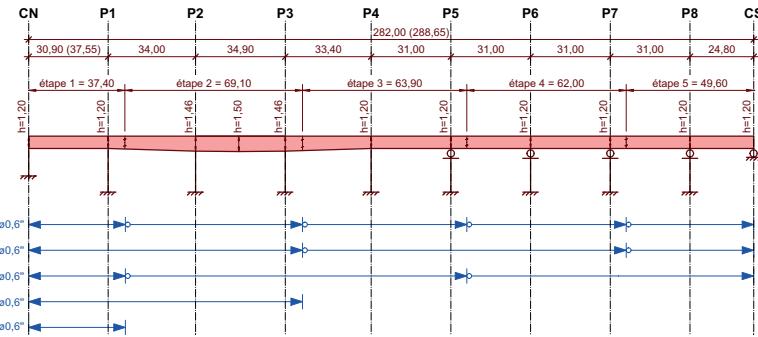


Fig. 6
Concept de précontrainte.
Post-tensioning concept.



Fig. 7
Franchissement des voies et culée intégrale nord.
Track crossing as well as integral northern abutment.

pour les charges permanentes est cependant assurée grâce aux moments secondaires positifs considérables qui se produisent en raison de la section et du tracé de la précontrainte.

Infrastructure

Dans l'objectif d'une construction minimisant les besoins d'entretien, la culée nord et ses quatre piles voisines ont été reliées de manière monolithique à la superstructure, ce qui en même temps a un effet favorable sur la transmission des forces dues aux chocs de train. En plus, cette solution a permis d'éviter les problèmes constructifs connus des appareils d'appui et des joints de chaussée dans les ponts sur appuis biais, comme par exemple les forces de soulèvement dans les angles aigus des plaques ou les joints de dilatation obliques par rapport à l'axe du pont, dont la durabilité aurait en outre été affectée négativement.

such as, for example, uplifting reaction forces in the acute corners of the slabs, and expansion joints aligned obliquely to the bridge axis. The durability of the latter would have also been impacted here by its location in the intersection area (significant horizontal loads due to turning trucks).

Longitudinal expansion of the bridge is possible at the southern piers and the southern abutment. In each case, two spherical bearings are used, one of which is designed for longitudinal movement and the other for movement in all directions. The use of the two bearings allows for the transfer of torsional actions from the superstructure, as a result of eccentric loads, at each pier. The dimensions of the standard elliptical piers were determined based on the minimum space required between the support points to avoid uplifting forces and the

tivement dans le cas présent par sa position dans la zone du carrefour (forte sollicitation due au trafic lourd bifurquant).

L'appui du pont sur les piles sud et la culée sud est mobile dans le sens longitudinal avec chaque fois deux appareils d'appui sphériques, dont l'un permet les mouvements dans le sens longitudinal du pont et l'autre est mobile dans toutes les directions. La disposition de deux appareils d'appui permet la transmission des moments de torsion du tablier, dus à des charges excentriques, à chaque pile. L'écart minimum entre les appuis, nécessaire pour éviter des réactions d'appui négatives, ainsi que l'encombrement des appareils d'appuis ont été déterminants pour les dimensions des piles elliptiques.

La stabilité latérale de l'ensemble du pont est garantie par la culée intégrale et les piliers reliés de manière monolithique à la superstructure dans la zone de l'extrémité nord du pont. À cet effet, le niveau de la roche près de la sur-

dimensions of the spherical bearings.

The integral abutment and the northern piers connected monolithically with the superstructure ensure the horizontal bracing for the entire structure. The bedrock located close to the surface allowed for very efficient foundations in this area.

Foundations

The concrete wall of the integral abutment on the north end as well as the northernmost pier are founded using spread footings on the molasse rock. Each of the remaining piers that are monolithically connected to the superstructure is set on three bored piles $\varnothing = 1.50$ m which are positioned in a single row transverse to the bridge axis in order to minimise restraints arising from the longitudinal movements of the superstructure.

For the southern piers and abutment, pile footings with four large bored piles $\varnothing = 1.30$ m were used due to the movable supports

face dans cette zone a permis des fondations très performantes.

Fondations

La paroi en béton de la culée intégrale au nord et la pile la plus au nord sont fondées sur semelles superficielles dans la molasse. Les autres piles, reliées de manière monolithique à la superstructure, sont fondées dans la molasse à l'aide de trois pieux forés de diamètre 1,50 m ancrés dans la roche, disposés en une ligne dans la direction transversale des piles pour minimiser les sollicitations dues aux déformations imposées par les déplacements longitudinaux de la superstructure.

Pour les piles sud ainsi que pour la culée sud par contre, les fondations ont été prévues avec quatre pieux de diamètre 1,30 m disposés en rectangle, afin d'en assurer la stabilité, en présence d'appuis mobiles.

Exécution des travaux

Les deux piles proches des voies ainsi que leurs fondations ont été



Fig. 8
Vue de l'intrados du pont et des piliers.
View of superstructure and piers from below.



Fig. 9
Bétonnage de la semelle sur pieux du pilier 3.
Concreting of pile cap of pier 3.



Fig. 10

Vue aérienne en état de construction.
Aerial view during construction.

of the superstructure, and in order to ensure the stability of the substructure elements.

Construction

Before erecting the protective tunnel for the works over the existing tracks, the two piers and associated foundations adjacent to the tracks were constructed during night work. The bridge superstructure was constructed in five stages starting from the monolithic abutment in the north, so that temporary stabilising measures could be avoided. A concreting stage consisted of two spans, with the exception of the northern end span in the area of the widening of the superstructure, which required its own casting stage due to the large volume of concrete.

Due to the given geology, the falsework of each span was supported on either one or two temporary piers on pile foundations. For this purpose, wooden piles were used, which enabled an economical and swift construction. Preparation works for the construction of the bridge began in the autumn of 2016. All foundations and piers, the two abutments and all five superstructure stages were concreted in 2017. The finishing works with the edge

entièrement réalisées en travail de nuit avant la construction du tunnel de protection nécessaire pour la réalisation du pont sur les voies existantes en service. La construction de la superstructure du pont s'est effectuée en cinq étapes à partir de la culée monolithique au nord afin de pouvoir renoncer à des mesures temporaires de stabilisation. Une étape de bétonnage comprenait à chaque fois deux portées, à l'exception de la travée de rive nord dans la zone d'élargissement qui a exigé une propre étape en raison de la cubature importante.

En raison de la géologie, le cintre a été prévu avec un ou deux appuis intermédiaires avec fondation profonde par travée. Le choix de pieux battus en bois a à cet effet permis un déroulement des travaux économique et en même temps rapide.

Les travaux préparatoires à la construction du pont ont commencé en automne 2016. Toutes les fondations et les piles, les deux culées ainsi que les cinq étapes de la superstructure ont été bétonnés en 2017. Les travaux de finition avec les bordures, la réalisation de l'étanchéité et du revêtement ainsi que les constructions routières et les travaux d'aménagement ont suivi en 2018.

beams, surfacing and the application of waterproofing, as well as adjustments to the road and landscaping followed in 2018.

Auteurs/Authors

Samuel Hörmann
MSc ETH Bau-Ing.
dsp Ingenieure + Planer AG
CH-8610 Uster
samuel.hoermann@dsp.ch

Martin Bimschas
Dr. sc. ETH, ing. civil dipl.
dsp Ingenieure + Planer AG
CH-8610 Uster
martin.bimschas@dsp.ch

Balz Amrein
Architecte dipl. ETH/SIA
Ing. en électricité dipl. ETH/SIA
Balz Amrein/Architektur/Brückenbau
CH-8005 Zurich
mail@balzamrein.ch

Walter Kaufmann
Prof. Dr. sc. techn., ing. civil dipl. ETH
ETH Zurich
CH-8093 Zurich
kaufmann@ibk.baug.ethz.ch

Beat Meier
Ing. civil dipl. ETH
dsp Ingenieure + Planer AG
CH-8610 Uster
beat.meier@dsp.ch

Raoul Spataro
Ing. civil dipl. ETH
Spataro Petoud Partner SA
CH-6500 Bellinzona
spataro@ingegnerispp.ch