

Die Letzigrabenbrücke und die Kohlendreieckbrücke

The Letzigraben bridge and the Kohlendreieck bridge

Aldo Bacchetta, Luc Trausch, 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 Brückenlänge von 396 m und einer Gesamtlänge inkl. Rampen 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 Trasse freigehalten werden. Diese Arbeiten im hochfrequentierten Gleisbereich konnten zu einem grossen Teil nur in den Zugspausen während der Nacht stattfinden. Die Pfählungs-, 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 falsework 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-Wochentakt erstellt. Eine besondere Herausforderung bei der Erstellung 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 Stegachse 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 $\varnothing 15.7$ mm. This required core drillings $\varnothing 125$ 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 Lösungssuche 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 $\varnothing 15,7$ mm. Dafür waren Kernbohrungen $\varnothing 125$ 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 aufgeraute Betonoberfläche und eine eingeklebte Bewehrung in der Verbundfuge gewährleistet.

Bauherr/Owner

SBB AG und Kanton Zürich
SBB Grossprojekt DML/
Projekte Region Ost

Planung und Bauleitung/ Planning and site management

Ingenieurgesellschaft 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 a 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 Hilfiger-Gebäudes.
Kohlendreieck bridge – passing over the Hilfiger 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 m ³ / 11 800 m ³

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 m ³ / 11,800 m ³

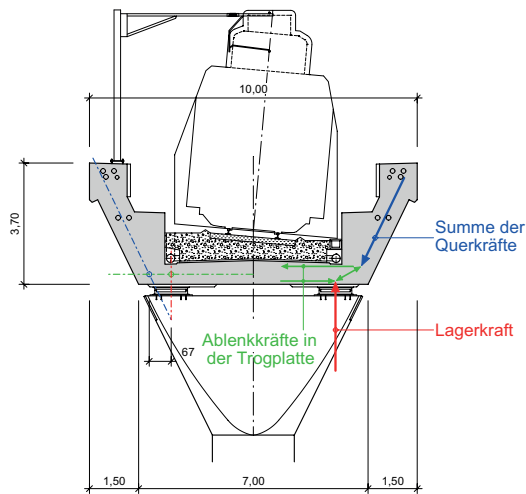


Fig. 6
Krafteinleitung der Lagerkräfte in die Brückenstege.
Introduction of bearing forces into the bridge webs.

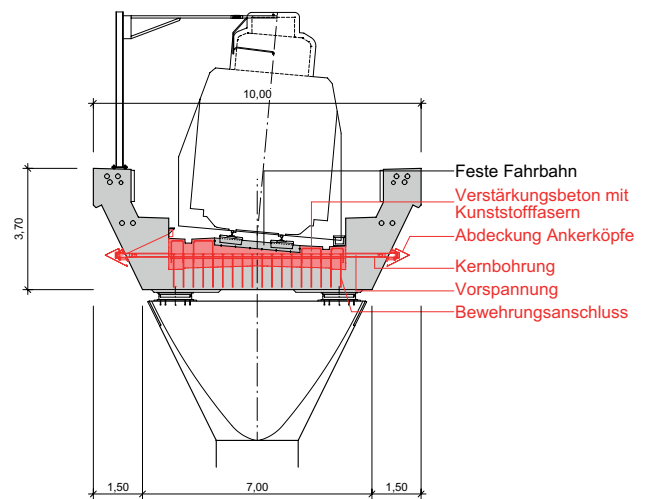


Fig. 7
Verstärkung der Trogplatte und feste Fahrbahn.
Strengthening of the trough slab and unballasted track.

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 aufgeraute 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, sodass 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. 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.

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 schlichten



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. $\frac{1}{7000}$ 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 Trausch
Dr. sc. techn., dipl. Bauing. ETH,
l.trausch@bp-ing.ch

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

Bänziger Partner AG, CH-8045 Zürich