Zeitschrift: Tracés : bulletin technique de la Suisse romande
Herausgeber: Société suisse des ingénieurs et des architectes
Band: 134 (2008)
Heft: 22: Chantiers dans le trafic

Artikel: Lancer un pont dans la ville
Autor: Thomann, Michael / Guscetti, Gabriele / Pirazzi, Claudio
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-169866

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 01.08.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Michel Thomann, Gabriele Guscetti et Claudio Pirazzi

Lancer un **pont** dans la ville

Le développement de la Ville de Lucerne nécessitait le remplacement du Langensandbrücke, un pont routier existant réalisé en 1938, par un nouveau pont dimensionné selon les exigences actuelles de mobilité urbaine. Ce projet de reconstruction a fait l'objet en 2004 d'un concours international ouvert, qui a été remporté par le bureau Guscetti & Tournier SA, associé avec les architectes Ueli Brauen et Doris Wälchli. Construit par étape afin de maintenir le trafic en permanence, le montage de la première moitié du pont, qui doit permettre la mise hors service et la démolition de l'ancien ouvrage, s'achèvera en décembre 2008. L'ouverture définitive du nouveau pont est prévue pour fin 2009.

Reliant deux zones de développement séparées par des voies de chemin de fer, le Langensandbrücke occupe une position très stratégique du sein de la Ville de Lucerne (fig. 1). Les exigences du maître d'ouvrage étaient dès lors claires, mais assez contraignantes. Il fallait d'abord conserver l'implantation actuelle du pont et doubler sa capacité en matière de trafic routier. Ensuite, la construction ne devait en aucun cas engendrer une interruption de l'exploitation des trafics ferroviaire, routier ou piétonnier.

1

Une forme née de contraintes

Le tissu urbain à proximité du pont est extrêmement dense et comprend une multitude de flux. Ce sont ces flux urbains qui ont guidé nos premières réflexions avec l'architecte, nous incitant à rechercher une solution simple, calme et clairement lisible dans un milieu caractérisé par sa complexité. Les choix conceptuels du projet conduisent ainsi à un ouvrage répondant de façon explicite aux nombreuses contraintes exprimées précédemment.

D'un point de vue formel, le projet lauréat (fig. 4) est le résultat d'une synthèse entre la fonctionnalité, les méthodes de construction, le comportement structurel et le contexte urbain dans lequel il s'insère. La forme retenue s'inscrit parfaitement dans la limite du gabarit des voies CFF et le profil de la route. Cette forme suit approximativement la répartition longitudinale des moments de flexion d'une poutre simple, avec une hauteur statique maximale située à mi-travée.

En matière de réalisation, il a fallu prévoir un montage du pont en deux étapes, de façon à ne pas avoir à interrompre la circulation routière. La première étape comprend le lancement de la première moitié latérale du nouveau pont. Ces travaux impliquent d'abord la mise en place du premier des deux caissons en acier qui constituent la section transversale finale du pont. On peut alors mettre en service provisoire cette première moitié de pont pour une période d'environ douze mois, laps de temps nécessaire pour la démolition de l'ancien ouvrage et l'exécution de la seconde partie du pont.

Le futur assemblage des deux « demi-ponts » constitue sans aucun doute une des phases les plus délicates du projet. Elle exige bien évidemment une précision importante de la géométrie, d'autant plus que les deux parties sont fabriquées avec des contreflèches relativement conséquentes de 65 cm ($w_0 \approx L/125$) pour compenser les déformations dues aux charges permanentes. La figure 2 montre la décomposition théorique de ces contreflèches. L'ajustage est encore compliqué par l'âge de la première partie du pont. Ayant vécu environ

Fig. 1 : Vue aérienne de Lucerne avec l'implantation du Langensandbrücke

Fig. 2: Déformations théoriques du « demi-pont » lors de la première étape

Fig. 3 : Vue en plan et élévation du nouveau pont

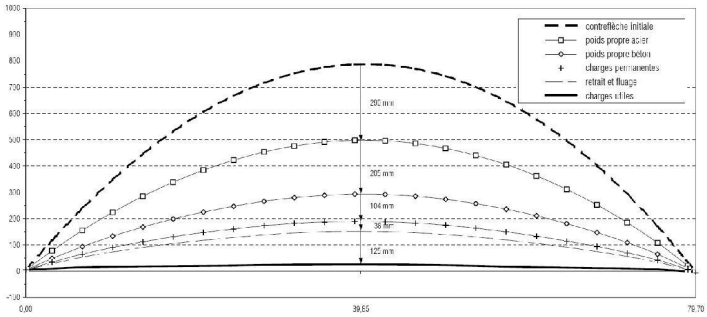
Fig. 4 : Photomontage du nouveau Langensandbrücke dans un contexte urbain particulièrement dense

douze moins de plus, son tablier en béton aura déjà subi une grande partie de son retrait responsable de déformations d'environ 40 mm. La prévision des déformations et la garantie de la géométrie pour un tel ouvrage restent difficiles et exigent une bonne exactitude du modèle numérique et de l'exécution. Toutefois, un réglage vertical de +/- 50 mm à l'aide de vérins installés sur les étais provisoires encore en place reste possible.

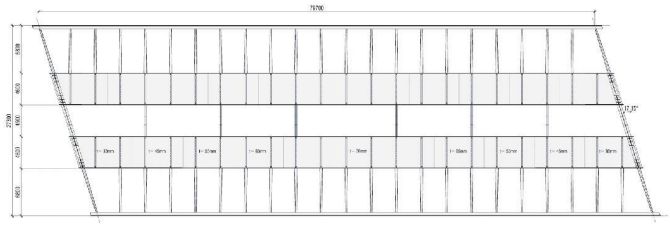
Système porteur et section transversale

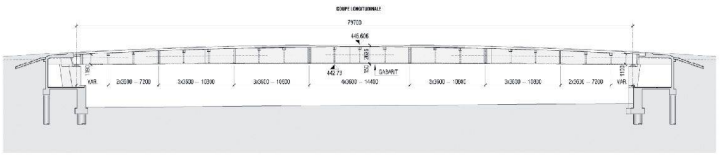
La nouvelle structure franchit les 79,70 m de portée avec un système de poutre simple mixte acier patinable-béton (fig. 3). La section transversale, d'une largeur de 27,30 m, comprend deux caissons métalliques dont la hauteur des âmes varie entre 1,18 m et 2,20 m, ce qui correspond à un élancement considérable d'environ L/35. Les trottoirs, qui fonctionnent en porte-à-faux, sont fixés latéralement le long du pont, légèrement en contrebas de la chaussée routière.

Avec une largeur de 4,50 m chacun, les caissons assurent au pont une forte rigidité en torsion. L'épaisseur des tôles utilisées pour la membrure inférieure des caissons varie de 30 mm aux extrémités pour atteindre 70 mm à mi-travée. Les caissons sont rigidifiés par un système d'entretoises en cadre, régulièrement espacées de 3,60 m, dont une sur trois est renforcée (en treillis). Agissant comme des raidisseurs du caisson tous les 10,80 m, ces entretoises principales garantissent l'introduction des efforts de torsion dans le caisson. La position transversale des deux caissons a été fixée de façon à ce que, lors de la phase provisoire d'exploitation du premier « demi-pont », la torsion reste aussi faible que possible sous charges permanentes. La figure 7 montre l'évolution de la



2




3

4

Fig. 5 : Montage à blanc en atelier, avant le soudage de trois éléments du pont : deux tronçons de trottoir et un demi-caisson

Fig. 6 : Contrôle des appuis glissants pendant le lancement (Photo Mario Kunz)

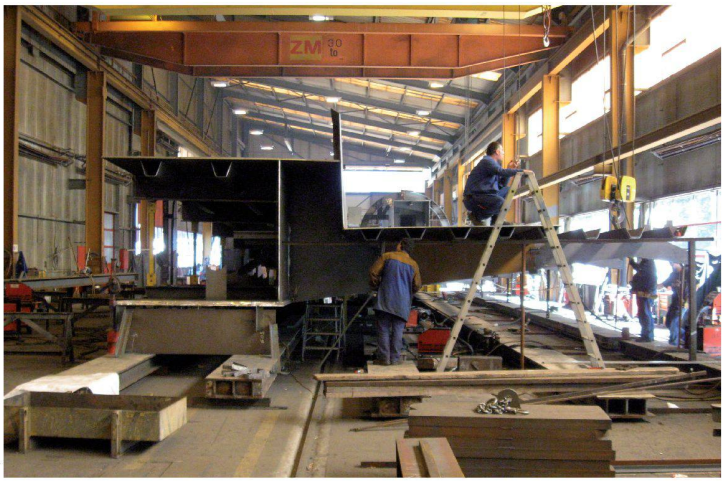
section du pont : on y voit notamment la composition des différents éléments soudés sur place, la section du « demi-pont » mis en service provisoire pendant près d'une année ainsi que la section définitive.

Associés à une dalle en béton armé de 24 cm d'épaisseur, les caissons en acier composent une section mixte. La liaison entre les matériaux est assurée par des goujons à tête, soudés sur l'aile supérieure de la section en acier. L'effet mixte de la section augmente considérablement la rigidité en flexion. Cette augmentation, qui se situe à mi-travée, correspond à près de 40 % de plus que la seule section en acier.

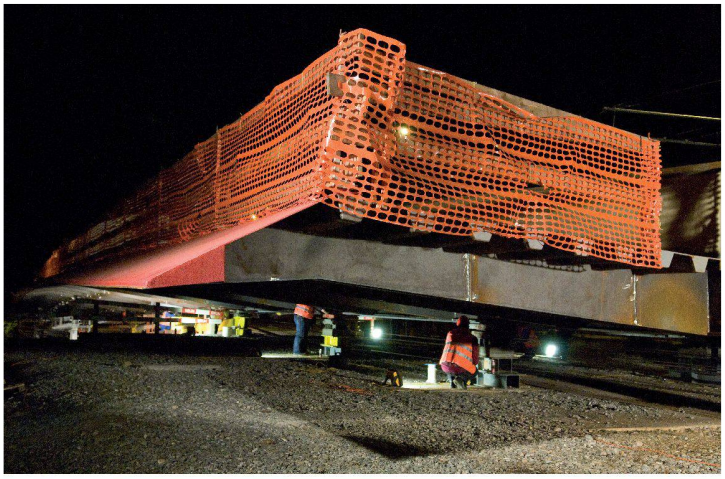
Effet du biais des appuis

Le pont repose sur des appuis dont l'axe est en biais de 17° environ par rapport à la perpendiculaire à l'axe de l'ouvrage. Ce biais introduit une torsion non négligeable sur les appuis, provoquant une répartition non-uniforme des réactions d'appui sous charges permanentes. Ce phénomène est encore amplifié par l'excentricité des trottoirs.

Pour favoriser une répartition plus uniforme des réactions d'appuis, il a été décidé, pour chaque demi-pont, de soulever de 30 mm les deux points d'appuis les plus éloignés sur la diagonale. Cette astuce permet d'une part un rééquilibrage des réactions d'appuis et garantit d'autre part des réactions d'appui minimales vers le haut (absence de réactions négatives). Cette légère surélévation des points d'appui extrêmes a dû être prise en considération dans la géométrie initiale des caissons et des trottoirs sous forme de contreflèches.



5



6

Analyse numérique

L'analyse globale de la structure (calcul des efforts et déformations) repose sur un modèle barre. Dans ce modèle, qu'on a appelé modèle « tri-barre », chaque caisson est modélisé par trois barres longitudinales. Deux des barres sont utilisées pour modéliser le comportement en flexion et en effort tranchant, alors que la troisième barre modélise la rigidité en torsion. Ce modèle, qui a notamment permis de mieux comprendre les interactions entre les flux d'efforts dus à la flexion et ceux dus à la torsion ou l'effet de l'entretoise d'appui en biais, permet une exploitation relativement facile et transparente des résultats.

Certains détails ont été étudiés avec des modèles de calcul par éléments finis, notamment pour appréhender le comportement structurel de la dalle orthotrope mixte, calculer les contraintes de fatigue ou encore définir le flux des efforts dans des zones particulières. Ces calculs ont par exemple montré que la mise en place d'une armature inférieure pour la dalle en béton n'était pas nécessaire.

Le fort élancement du nouveau pont le rend naturellement sensible aux vibrations. Cette situation est particulièrement critique après la première étape de montage, lorsque le trafic doit emprunter le premier « demi-pont » qui ne comprend qu'un seul caisson. Le passage de véhicules lourds peut faire vibrer la structure et provoquer ainsi des accélérations verticales importantes susceptibles d'être perçues par un être humain. Notre étude numérique – effectuée elle aussi à partir du modèle « tri-barre » – a montré que le passage sur la demi-structure de deux camions consécutifs de 20 to chacun risquait d'engendrer des accélérations dépassant le seuil de confort.

Même si ce cas de figure doit être considéré comme exceptionnel et que ce risque ne concerne qu'une situation provisoire qui ne dure qu'une douzaine de mois, il a été décidé de procéder prochainement des essais dyna-

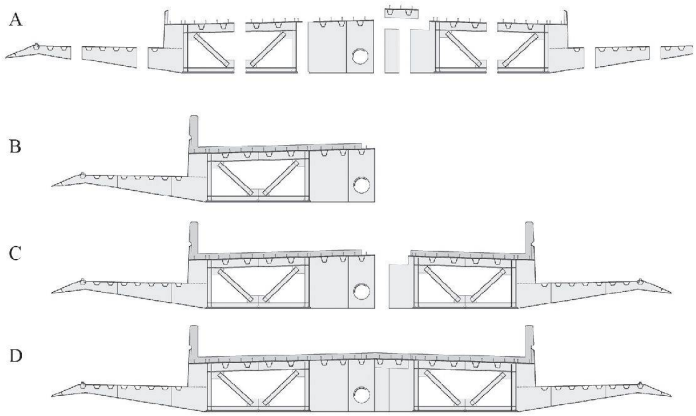
Fig. 7 : Evolution de la section du pont au cours de son montage : pièces détachées, avant leur assemblage sur place (A) ; « demi-pont » lors de la phase provisoire (B) ; section avant clavage de la deuxième étape (C) ; section finale (D)

Fig. 8 : Lancement de nuit, par-dessus les voies ferroviaires (Photo Claudio Pirazzi)

miques, seul moyen de déterminer le comportement dynamique avec précision.

Fabrication des caissons

La fabrication de la charpente métallique a commencé en mars 2008. Pour se prémunir de toute surprise sur le chantier concernant la géométrie de l'ouvrage, un montage à blanc avant soudage a été effectué en atelier. Cet exercice, qui consiste à assembler de manière provisoire en atelier des pièces qui seront définitivement liées une fois transportées sur le chantier, portait principalement sur les joints de montage longitudinaux qui assurent le lien entre les deux demi-caissons et sur ceux prévus entre les éléments de trottoir et le caisson (fig. 5). Ce montage « à vide » a permis de s'assurer que les pièces possèdent bel et bien la géométrie souhaitée, en particulier au droit des joints précités.

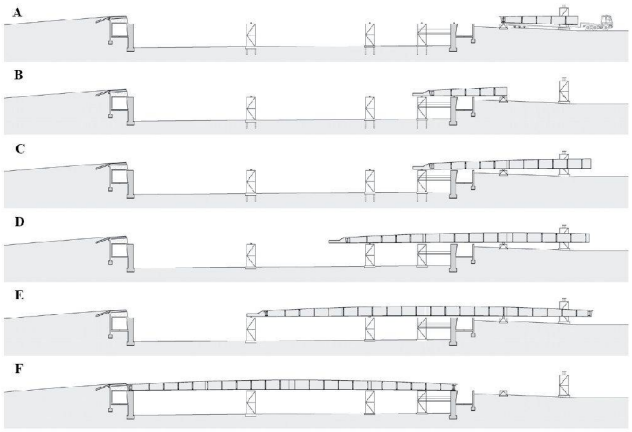


7

8

Fig. 9 : Evolution de la section du pont au cours de son montage : pose du 1er élément (A) ; fin du 1er lancement (B) ; pose du 2ème élément (C ; fin du 2ème lancement et pose du 3ème élément (D) ; fin du 3ème lancement et pose du 4ème élément (E) ; fin du 4ème lancement (F)

Fig. 10 : Les deux premiers appuis pour le lancement (Photo Mario Kunz)



9

En revanche, compte tenu de la taille et du poids des éléments – jusqu'à 23 mètres de longueur et environ 50 to pour chaque demi-caisson – ainsi que du calendrier de production tendu, il n'était pas possible de contrôler par un montage à blanc en atelier que les joints perpendiculaires à l'axe de l'ouvrage correspondaient parfaitement. Afin de garantir leur bonne concordance, plusieurs cotes de contrôles ont été spécifiées aux extrémités des tronçons, et la verticalité des âmes a été systématiquement contrôlée. Des possibilités de réglage en cours de montage ont en outre été prévues : c'est ainsi que les ailes et les âmes n'ont par exemple pas été soudées les unes aux autres sur environ 50 cm depuis chaque extrémité des pièces pour pouvoir, le cas échéant, corriger l'alignement des âmes une fois les semelles alignées.

Choix des aciers

Le choix de l'acier pour le Langensandbrücke présente quelques particularités. Tout d'abord, il s'agit d'acier dit « patinable » – également connu sous la dénomination commerciale *Corten*®. Cet acier possède une composition chimique sensiblement modifiée par rapport aux aciers traditionnels, en particulier par l'ajout de phosphore, de cuivre, de chrome, de nickel ou de molybdène. Cet alliage a la propriété de former naturellement une couche de patine (corrosion) dense, imperméable à l'eau et à l'air, qui assure une fonction autoprotectrice en empêchant la progression ultérieure, vers le cœur de la tôle, de la corrosion. Par conséquent, ce type d'acier ne nécessite pas de traitement anticorrosion, ce qui constitue une économie significative tant lors de la construction de l'ouvrage que pour son entretien. Le soudage de l'acier patinable nécessite un matériau d'apport particulier, qui doit lui aussi résister à la corrosion atmosphérique. Pour le reste, ces aciers possèdent les mêmes carac-

10

Fig. 11 : Appui de lancement. Le monteur assure l'introduction correcte des plaques en téflon-néoprène entre l'aile inférieure du pont et la surface en acier inox poli de l'appui. La pièce jaune boulonnée à l'appui sert au guidage latéral du pont.

Fig. 12 : Robot de soudage. Le robot est guidé par un rail fixé à la charpente à l'aide d'aimants. Le robot permet d'augmenter la cadence de soudage tout en garantissant une soudure de haute qualité.

téristiques mécaniques (limite élastique, résilience) que les aciers traditionnels.

En ce qui concerne la nuance, le choix s'est porté sur un acier S355. Comme le pont est plutôt souple et que son dimensionnement est avant tout déterminé par des critères de déformation, le recours à un acier de plus haute limite élastique ne présentait aucun intérêt.

Le choix de la qualité (résilience) a fait l'objet d'intenses discussions. Finalement, la spécification a été réalisée selon l'annexe A de la norme SIA 263, soit avec une qualité J2 pour les tôles jusqu'à 65 mm et K2 pour les tôles de 70 mm de aile inférieure à mi-travée. A noter que les normes européennes (Eurocodes) sont plus sévères en la matière et recommandent l'emploi d'aciers thermomécaniques S355 M ou à laminage normalisant S355 NL pour les tôles de 70 mm d'épaisseur pour ce type d'application. Les experts de l'ICOM-EPFL mandatés à ce sujet ont toutefois estimé que, compte tenu des températures du lieu et l'exploitation prévue (types de charges, effets dynamiques), la qualité K2 suffisait pour assurer la sécurité du nouveau pont.

Assemblage des pièces

Après la mise en place des installations, le montage de la première moitié du pont a débuté à mi-juillet 2008. Une des particularités mise en place pour ce chantier tient au mode de déchargement des camions. Comme les demi-caissons sont très lourds (avec 45 et 55 to respectivement), l'emploi d'une grue se serait révélé très onéreux et particulièrement délicat sur l'étroite place de montage en plein cœur de Lucerne. Nous avons donc exploité au maximum les possibilités offertes par les camions, en particulier la possibilité de procéder à un réglage vertical du pont de chargement. Les remorques utilisées disposaient d'un système hydraulique qui autorise une course verticale d'environ 20 cm. Les camions entraient en marche arrière sur la place d'installation et déposaient leur chargement sur des étais provisoires spécialement conçus à cet effet. La difficulté de la manœuvre tenait au fait que les pièces devaient être posées avec une précision suffisante pour pouvoir souder les joints entre les pièces, sans avoir à procéder à un ajustage ultérieur. La précision de manœuvre des camions (poids total de 80 tonnes) est de l'ordre du centimètre, tant transversalement que longitudinalement. L'expérience a prouvé l'efficacité de cette méthode de mise en place des éléments.

Lancement au-dessus des voies

Une fois les éléments assemblés, le pont a été mis en place par lancement (voir encadré). L'exiguïté de la place d'ins-

Montage par lancement

Le lancement d'un pont consiste à assembler ses diverses parties dans une zone d'installation pour ensuite le tirer jusqu'à sa position définitive (fig. 9). Ce procédé permet de concentrer le travail d'assemblage et de soudage dans la zone d'installation, ce qui est particulièrement intéressant en matière de sécurité. Cette méthode de montage est particulièrement judicieuse lorsque l'accès sous l'ouvrage est difficile, voire impossible.
Le dispositif de lancement est principalement constitué de quatre éléments utilisés pour la traction, le glissement, le guidage et la retenue du pont. La traction est généralement appliquée par des tire-fort qui actionnent des câbles en acier. Pour atteindre la force de traction requise, un mouflage (système de poulies permettant de démultiplier la force de traction) est le plus souvent indispensable. Pour le Langensandbrücke, deux tire-fort de 6 tonnes chacun, mouflés 6 fois, permettaient d'appliquer au maximum 72 tonnes de traction, soit bien plus que les 50 tonnes nécessaires pour vaincre le frottement sur les appuis de glissement et la légère pente ascendante. Les appuis (dispositif de glissement) peuvent être de deux natures : des appuis en téflon-néoprène glissant sur une plaque d'acier inoxydable poli, ou des chaises à galets sur lesquelles l'ouvrage roule. Le Langensandbrücke a été lancé sur des appuis en téflon-néoprène (fig. 11). Le dispositif de guidage assure que l'ouvrage suive la direction souhaitée pendant le tirage. Il est constitué de patins couverts d'une plaque en téflon prenant appui sur la face latérale de l'aile inférieure du pont. Enfin, le dispositif de retenue est un équipement de sécurité rarement employé, mais pouvant être très utile. Il permet d'éviter un glissement non contrôlé de l'ouvrage vers l'avant (en particulier lorsque le lancement est effectué à la descente) ou alors de tirer l'ouvrage au besoin vers l'arrière, en cas d'incident technique avec les appuis glissants ou le dispositif de traction. Ce dispositif est également constitué d'un câble en acier actionné par un tire-fort et mouflé pour atteindre la force requise.

11

12

Fig. 13 : Bec de lancement avec en arrière-plan les appuis intermédiaires

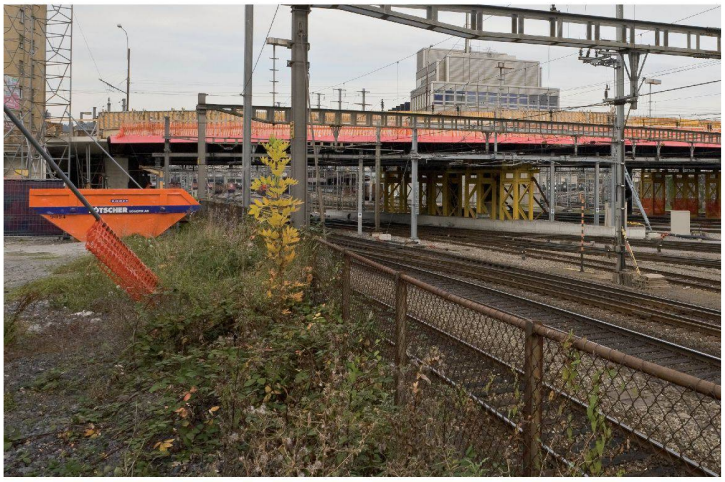
Fig. 14: Vue du premier « demi-pont » (Photos Mario Kunz)

(Sauf mention, tous les documents illustrant cet article ont été fournis par les auteurs.)

Suivi par monitoring à long terme

Même si le comportement structural de ce type d'ouvrage a été beaucoup étudié dans les milieux universitaires et qu'un nombre important de références existe, il est toujours difficile pour un ingénieur de juger de l'exactitude réelle de ses calculs. C'est pour cette raison qu'en collaboration avec le laboratoire d'informatique et de mécaniques appliquées à la construction (IMAC) de l'EPFL, un système de monitoring a été élaboré pour mesurer les allongements du béton et de l'acier sur toute la hauteur de la coupe transversale à la mi-travée du pont. Les mesures récoltées lors d'un essai de charge statique seront complétées de mesures à long terme effectuées au cours de l'exploitation du pont. On espère ainsi pouvoir vérifier la validité de nos hypothèses et l'efficacité de nos modèles de calcul, en particulier pour ce qui concerne le comportement mixte à court et à long terme et les effets mixtes locales sous charge concentrée.

13



14

tallation empêchait d'y construire l'entier du pont pour le lancer d'un seul bloc et le montage s'est donc effectué en quatre étapes (fig. 9). A chaque étape, cinq éléments de pont – deux demi-caissons, deux éléments de trottoir et un élément de dalle orthotrope (fig. 7) – étaient acheminés sur le site, assemblés et réglés les uns à côté des autres pour être soudés d'abord entre eux puis avec les éléments de l'étape précédente. Le soudage a été en partie effectué à l'aide de robot de soudage automatique (fig. 12). L'ensemble était alors poussé d'environ 20 m, dégageant ainsi la place d'installation pour l'assemblage des éléments suivants. Une étape complète (assemblage, soudage et lancement) durait un peu moins de trois semaines. Compte tenu de l'intense trafic ferroviaire sous l'ouvrage en construction, le lancement s'effectuait de nuit, à une vitesse d'environ 8 à 10 mètres par heure.

Le lancement se faisant au-dessus des voies ferroviaires, les gabarits de circulation des trains ne laissaient que peu de place pour des tours d'appui provisoires. Ces dernières ont été placées dans de fines bandes libres entre les voies. Il a néanmoins fallu construire une tour particulière pour un des appuis de lancement à la verticale duquel il n'était pas possible de placer un pilier (fig. 10 et 13). Cet appui repose sur une poutre en porte-à-faux constituée de deux HEB1000 jumelés. La réaction d'appui maximale de 2000 kN est ainsi reportée sur les tubes ROR 457x20 S355 situés plus à gauche.

Un avant-bec de sept mètres a été utilisé (fig. 8). Son but n'était pas de réduire la flexion dans le caisson dont la résistance était largement suffisante pour le lancement. Il servait à faciliter l'accostage sur les appuis intermédiaires – grâce à son nez relevé – et à garantir la sécurité face au risque de basculement, en particulier lors des deux premières étapes, lorsque le contre-poids constitué par la longueur du pont en arrière du premier appui était relativement faible (fig. 9). L'avant-bec a été démonté à la fin de la troisième étape, alors que la sécurité au renversement était largement assurée, pour permettre de bétonner le mur arrière de la culée d'accostage avant la fin du lancement. L'accostage sur la culée du côté « Bundesplatz » s'est effectué sans la moindre difficulté.

Mesures pour le contrôle

Pour assurer le contrôle et la sécurité du lancement, des mesures ont été effectuées pendant les travaux. Le suivi du tassement des appuis en cours de lancement ont révélé un très bon comportement. A titre d'exemple, les tassements des micropieux construits sous les tours d'appui provisoi-

res sont restés nettement inférieurs aux valeurs calculées : sous la charge maximale de 2600 kN (juste avant l'arrivée de l'ouvrage sur la culée opposée), le groupe de micropieux ne s'est tassé que de 5 mm. Les réactions d'appuis relevées sur les appuis situés dans le domaine des voies CFF ont dans l'ensemble montré une bonne correspondance entre calculs numériques et réalité et les réactions sont restées inférieures aux valeurs limites admises par l'ingénieur et l'entreprise. Aucune correction ultérieure des hauteurs d'appui n'a dû être effectuée, bien que cette possibilité ait été envisagée et préparée sur le chantier. Fait intéressant, on a observé une importante redistribution des réactions d'appuis entre les deux âmes du caisson en dépit de tassements d'appui très faibles. Ce phénomène s'explique par la très forte rigidité torsionnelle de l'ouvrage. Pour des raisons analogues, les légères irrégularités de l'intrados du pont (nées des tolérances géométriques et des joints de montage de l'aile inférieure) ont engendré une forte redistribution des réactions d'appuis.

Un programme chargé

Une fois lancé, le pont a été abaissé sur ses appuis définitifs. L'entreprise a alors bétonné le tablier et la bordure, scellé les joints de chaussée. Elle travaille actuellement au coulage de l'asphalte et à la préparation des rampes d'accès des culées. La moitié de pont construite cette année (fig. 14) sera mise en service à fin décembre et le pont actuel pourra alors être détruit. Le montage de la seconde moitié débutera en mai 2009 alors que la mise en service de l'ouvrage complet est prévue pour décembre 2009.

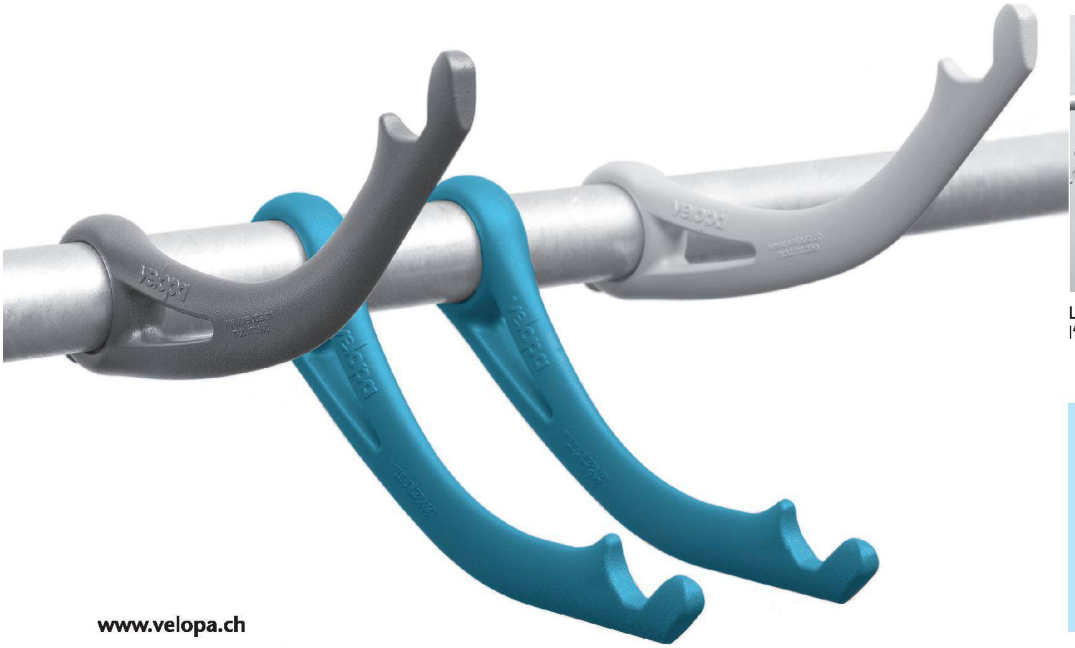
Michel Thomann, dr ing. civil dipl. EPF
Zwahlen & Mayr, ZI 2, CH - 1860 Aigle

Gabriele Guscetti, ing. civil dipl. EPF
Claudio Pirazzi, dr EPF, ing. dipl. TU
Guscetti & Tournier S.A., CH - 1227 Carouge GE

Les intervenants :
Le Langensandbrücke est exécuté par l'entreprise totale constituée de Gebr. BRUN AG et Zwahlen & Mayr SA, associée au bureau d'architectes Brauen & Wälchli et aux bureaux de génie civil Guscetti & Tournier SA et PlüssMeyerPartner AG.

Afin, que les problèmes de parcage soient du passé.

velopa
swiss parking solutions



Le système de support de guidons pour maintenir l'ordre offre un parfait support et ménage les vélos.

Votre partenaire aux services de qualité et solutions innovantes.

parquer ■ abriter ■ bloquer

Velopa AG
CH-8957 Spreitenbach
+ 41 (0)56 417 94 00
marketing@velopa.ch

www.velopa.ch