

Evaluation d'un pont-rail sur le Rhin

Autor(en): **Brühwiler, Eugen**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Tracés : bulletin technique de la Suisse romande**

Band (Jahr): **136 (2010)**

Heft 09: **Rénover des structures**

PDF erstellt am: **22.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-109669>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

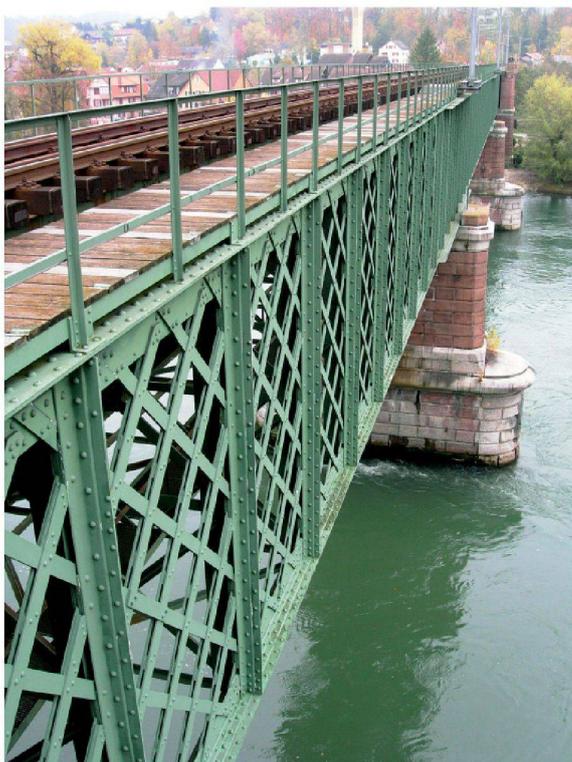
Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Evaluation d'un pont-rail sur le Rhin

Considéré dans un premier temps comme devant être entièrement reconstruit pour supporter un accroissement des charges de trafic, le pont-rail du Rhin à Koblenz (AG) sur la frontière germano-suisse a été l'objet d'une étude basée sur les projets des normes SIA 269 et ss « Maintenance des structures porteuses ». Une démarche qui a finalement permis le maintien en service d'un pont-rail riveté de haute valeur culturelle.

Histoire et économie

Lors de la construction du réseau ferroviaire européen au 19^e siècle, on a souvent édifié des ponts métalliques pour franchir des grandes portées. Ces structures étaient réali-



sées avec du fer puddlé ou, dès 1890, avec de l'acier doux. Les assemblages se faisaient par rivetage, une technique qui atteindra son apogée vers 1880-1910 et sera utilisée jusque dans les années 1950, le soudage s'imposant alors par sa plus grande rationalité.

Souvent spectaculaires, certains ponts-rails rivetés sont encore en service, mais la plupart d'entre eux ont disparus, remplacés dans les années 1970 et 1980 par des ouvrages en béton armé. On avait alors admis que les ponts avaient une capacité portante insuffisante et que les assemblages rivetés étaient vulnérables à la fatigue, sans toutefois le prouver par des méthodes adéquates. Dès 1982, des recherches menées à l'EPFL par le laboratoire de la construction métallique (ICOM) sous la direction du professeur Hirt, ont conduit au développement de méthodes d'ingénierie réalistes pour étudier les structures rivetées. Les résultats de ces recherches, qui ont été appliqués à plusieurs études de cas, ont également influencé le développement de méthodes pour d'autres structures existantes, notamment en béton. Ils ont aussi influencé les futures normes SIA 269 et 269/1 à 269/7 sur la maintenance¹ des structures existantes qui synthétisent l'état de connaissance actuelle dans le domaine.

Aujourd'hui, les compagnies ferroviaires exploitent leur infrastructure avant tout selon des critères économiques : un pont doit être utilisé aussi longtemps que son état et sa capacité portante le permettent sans générer des coûts d'entretien excessifs. L'année et le type de construction ne suffisent plus pour justifier le remplacement d'un pont. Cependant, les charges ferroviaires et le volume de trafic ayant augmenté sur la plupart des ponts rivetés encore en service, il convient de définir comment et sous quelles conditions (notamment économiques) ces structures peuvent demeurer en service malgré de nouvelles exigences d'utilisation.

Un pont emblématique

Mis en service en 1859, le pont-rail métallique sur le Rhin entre Koblenz (Argovie) et Waldshut (Allemagne) est le plus ancien ouvrage encore en service d'un type caractéristique de la construction ferroviaire du 19^e siècle en Europe continen-

Fig. 1 : Pont du Rhin à Koblenz, avec son treillis multiple riveté et ses piles en maçonnerie

Fig. 2 : Un train CFF à double étage franchit le pont lors de son ouverture à des trains de banlieue le 30 mai 1999 (Photo D. Heer, Eisenbahn-Revue, 7-8, 1999)

tale. Inventorié, largement conservé dans son état d'origine, il constitue de plus une référence clé dans l'œuvre de Robert Gerwig (1820-1885), l'un des principaux ingénieurs impliqués dans la construction des chemins de fer à cette époque (il fut notamment le constructeur de la rampe nord de la ligne du Gothard, des chemins de fer de la Forêt Noire et de la ligne Waldshut - Konstanz). Son esthétique naît de l'interaction entre la construction métallique rivetée et la maçonnerie en pierre naturelle des piles et des culées (fig. 1 et 2).

En dépit de la grande visibilité de la poutre continue à hauteur constante, l'élancement et la transparence du treillis multiple soulignent l'efficacité technique de la solution alors que la symétrie et la répétition d'éléments identiques créent un sentiment d'unité et d'ordre. Massives, les piles et les culées confèrent au pont une grande stabilité qui, par ses lignes strictes, contraste avec le paysage fluvial et se présente comme un franchissement bien en vue du Rhin. Les piles et culées en maçonnerie assurent une transition harmonieuse entre l'aspect très technique de la construction rivetée et l'environnement naturel du pont.

Caractérisé par une construction économique (utilisation minimale de matériaux), une durabilité prouvée par des coûts d'entretien faibles jusqu'à ce jour ainsi que par une apparence simple et claire, cet ouvrage est un monument de l'art de l'ingénierie des structures.

Objectif et démarche

Les chemins de fer allemands (DB Netz AG) et les Chemins de Fer Fédéraux suisses (CFF) sont co-propriétaires du pont. C'est la DB qui est responsable de sa surveillance et de sa maintenance, alors que les coûts sont répartis à parts égales entre les deux compagnies.

Dimensionné à l'origine pour deux voies ferroviaires, le pont a été sollicité par un trafic relativement modeste de quelque 1,2 million de trains (marchandises et voyageurs) répartis sur de plus de 150 ans. Suite à une étude de l'ICOM en 1994², réalisée à la demande du Canton d'Argovie qui souhaitait étendre le réseau de la S-Bahn, la ligne ferroviaire entre Koblenz et Waldshut a été électrifiée pour être exploi-



tée depuis 1999 par des trains de voyageurs CFF répondant aux exigences de la classe de ligne B1 (selon directive des chemins de fer européens : charge admissible par essieu de 180 kN, charge maximale linéaire de 50 kN/m).

L'objectif de la présente étude était de déterminer les interventions nécessaires pour remplir les conditions de la classe de ligne C3 (charge maximale par essieu de 200 kN, charge maximale linéaire de 72 kN/m), une exigence des CFF en vue de l'introduction de trains à deux étages. L'étude admet une période d'utilisation de 80 ans pour comparer la solution d'une conservation avec celle d'un remplacement par un nouveau pont. La mise en œuvre des interventions est prévue pour une admission de la classe de ligne C3 en 2015. Basée sur l'approche préconisée par la série des normes SIA 269, l'étude comprenait :

- une analyse du dossier d'ouvrage et des résultats de mesures in-situ effectuées dans le passé pour actualiser³ les valeurs pertinentes, tant au niveau des actions que des résistances,
- la vérification de la sécurité structurale et à la fatigue,
- la définition de la meilleure stratégie d'intervention.

Examen⁴ du pont

Sur la base des informations tirées des rapports d'inspection et d'une visite sur place, l'état de la construction rivetée a pu être qualifié de « bon », puisque les défauts et détériorations énumérés dans la norme SIA 269/3 ne se présentent pas ou alors uniquement de façon limitée. Le revêtement anti-corrosion est en bon état : depuis sa dernière rénovation en 1991, seuls des dégâts limités – sous forme de quelques zones de corrosion active et un revêtement délavé

¹ Maintenance selon la norme SIA 269 : Ensemble des activités et des mesures permettant de garantir la persistance ainsi que le maintien des valeurs matérielles et culturelles d'un ouvrage

² KELLER, A., BRÜHWILER, E., HIRT, M.A. : *Assessment of a 135 year old riveted railway bridge*, Proceedings, IABSE Symposium in San Francisco, August 1995, IABSE Report Vol. 73/2, pp. 1029-1034

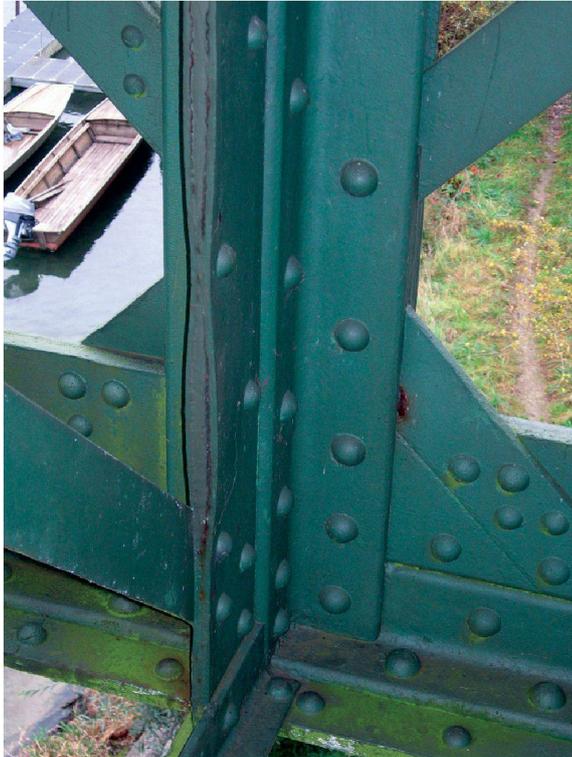
³ Actualisation selon la norme SIA 269 : Processus consistant à compléter les données existantes par de nouvelles informations

⁴ Examen selon la norme SIA 269 : Relevé et évaluation de l'état réalisés (y compris les vérifications de la sécurité structurale et de l'aptitude au service) pour une raison particulière, avec recommandation des mesures à prendre

Fig. 3 : Revêtement anti-corrosion – dégâts limités

Fig. 4 : Dispositif d'appui constitués de rouleaux

Tab. A : Modèles de charge ferroviaire actualisés



3



4

par endroits – sont apparus (fig. 3). Les dispositifs d'appui, constitués de rouleaux, sont en revanche endommagés et ne fonctionnent plus correctement (fig. 4). La maçonnerie en pierre naturelle des culées et des piliers montre des dégâts usuels, mais de faible importance.

Reconstruite en 1912, la voie ferroviaire est constituée de deux longerons sur lesquels sont fixés les traverses et les rails (fig. 5 et 6). Un calcul de l'endommagement par fatigue a montré qu'elle a supporté sans dégât important la sollicitation par le trafic ferroviaire jusqu'en 1999, date de l'introduction des trains régionaux de banlieue. A partir de cette date, la sollicitation de la voie a considérablement augmenté et des dommages, en particulier aux points d'appui sur les entretoises de la superstructure, ont été détectés lors des inspections en 2002. Si l'apparition de ces dommages ne pouvait être prédite par le calcul, elle n'est pas étonnante pour autant : il s'agit de dégâts déjà observés sur des constructions similaires dont l'origine a pu être élucidée à partir de mesures de déformation in-situ en 2005 et pour lesquels des réparations ont été directement effectuées.

Vérification de la sécurité structurale et à la fatigue

L'analyse structurale de la construction rivetée a d'abord été validée à partir de mesures de déformation datant de 1999. On a appliqué l'approche déterministe de la norme SIA 269, qui stipule que la sécurité structurale est vérifiée si le degré de conformité n remplit la condition suivante :

$$n = \frac{R_{d,act}}{E_{d,act}} \geq 1$$

La valeur d'examen de l'effet des actions $E_{d,act}$ a été déterminée en utilisant le modèle de charge ferroviaire actualisé des classes de ligne C3 et E5 (tab. A), multiplié avec un facteur d'amplification dynamique. Un facteur de charge actualisé pour les actions permanentes de 1,20 a été appliqué (selon norme SIA 269). Quant à la valeur d'examen de la résistance ultime $R_{d,act}$, elle a été déterminée à partir des valeurs du tableau B.

Les calculs ont montré qu'en matière de sécurité structurale, c'est la fatigue de la construction rivetée qui est déterminante, à savoir les sections soumises à la traction des ailes de la poutre maitresses. Les degrés de conformité les plus faibles (tab. C) prouvent que presque tous les éléments rivetés passent la vérification à la fatigue – déjà par rapport à la limite de fatigue, indiquant ainsi des réserves considérables – alors que la maçonnerie présente des réserves confortables en terme de capacité portante. Les vérifications plus

Classe de ligne	Charge d'essieu actualisée Q_{act} [kN]	Espacement entre les charges d'essieu actualisées en [m] pour un véhicule modèle	
		$Q_{act} \quad Q_{act}$	$Q_{act} \quad Q_{act}$
C3	200		
E5	250		

A

détaillées préconisées par la norme SIA 269, en utilisant des modèles plus affinés ou une approche probabiliste n'étaient dès lors pas nécessaires. Un résultat qui s'explique entre autre par le fait que la structure du pont avait initialement été dimensionnée pour deux voies.

Comparé aux aciers modernes, le fer puddlé n'offre qu'une faible ténacité, une propriété dont on déduit souvent qu'il y a un risque important de rupture spontanée d'éléments structuraux. L'analyse de ce danger, qui partait de l'hypothèse que des fissures de fatigue n'auraient pas été détectées lors des inspections, a été menée à partir de la mécanique de la rupture linéaire élastique. Les calculs ont permis de conclure qu'une fissure de fatigue se propageant à partir du bord d'un trou de rivet (type de fissure le plus probable) ne mènerait pas à une rupture spontanée d'un élément riveté en fer puddlé. Ce résultat s'explique principalement par le niveau de contrainte relativement faible dans la construction rivetée, même en cas d'augmentation des charges de trafic. De plus, en cas de défaillance locale, les sections composées à partir d'éléments structuraux rivetés permettraient une redistribution des contraintes dans la section elle-même ou dans le système porteur.

Selon ces résultats, le pont actuel dispose du potentiel nécessaire pour faire face à des charges ferroviaires plus élevées et à un prolongement important de sa durée d'utilisation. Toutefois, l'augmentation de la classe de ligne devra être mise en place prudemment, par étapes. La classe de ligne C3 sera décrétée en 2015 pour l'introduction par les CFF des trains à deux étages. Cette augmentation sera accompagnée par une surveillance accrue et un suivi par le biais de mesures du comportement in situ de la construction rivetée en fer puddlé et de la voie ferroviaire. Selon ces observations, une augmentation ultérieure des charges ferroviaires pourrait être admise en cas de besoin.

Interventions de maintenance

En dépit de ces bons résultats, des interventions de maintenance sont nécessaires pour améliorer certains détails de construction et, donc, sa durabilité. Ces interventions doivent naturellement être aussi économiques que possibles tout en étant compatibles avec les exigences émises par la protection des monuments (essentiellement en rapport avec l'apparence du pont). Quatre types d'interventions de maintenance ont ainsi été étudiées. Elles portent sur :

- la voie de roulement,
- la protection contre la corrosion des parties métalliques,
- les dispositifs d'appui,
- les éléments de maçonnerie en pierre naturelle.

Concernant la voie de roulement, il s'est avéré que l'installation d'une auge en acier avec ballast (une solution souvent appliquée dans le passé) ne serait techniquement (et financièrement) pas optimale, les réserves de portance actuelles devant avant tout servir à la reprise de charges ferroviaires supérieures. Autre variante étudiée, la mise en place d'une voie fixe sur une dalle (constituée d'éléments préfabriqués en béton armé) était une solution intéressante d'un point de vue technique et financier, mais à laquelle on a finalement renoncé en raison du peu d'expérience dont on dispose à ce

Construction rivetée : valeurs caractéristiques des propriétés (fer puddlé et d'assemblage riveté) selon norme SIA 269/1		
Limite d'élasticité	$f_{yk,act}$	220 N/mm ²
Résistance à la traction	$f_{uk,act}$	320 N/mm ²
Module d'élasticité	$E_{k,act}$	200 000 N/mm ²
Résistance ultime des rivets :	$f_{ukR,act}$	320 N/mm ²
- résistance au cisaillement	$\tau_{ukR,act} = 0.7 \cdot f_{ukR,act}$	224 N/mm ²
- pression latérale	$\sigma_{ukR,act} = 1.6 \cdot f_{ukR,act}$	512 N/mm ²
Ténacité	$K_{Ic,act}$	1350 N/mm ^{3/2}
Coefficient de résistance actualisé :		
- pour la vérification de la résistance et de la stabilité	$\gamma_{k,act}$	1.15
- pour les moyens d'assemblage et la vérification de la section nette	$\gamma_{k,act}$	1.30
Valeurs caractéristiques de la résistance à la fatigue :		
- catégorie de détails	$\Delta\sigma_{c,act}$	80 N/mm ²
- limite de fatigue	$\Delta\sigma_{D,act}$	64 N/mm ²
Coefficient de résistance actualisé pour la fatigue	$\gamma_{Mfat,act}$	1.15
Maçonnerie en pierre naturelle: valeurs caractéristiques des propriétés selon norme SIA 269/6		
Résistance à la compression	$f_{cMk,act}$	20 N/mm ²
Coefficient de résistance actualisé	$\gamma_{M,act}$	2.0

B

Construction rivetée : sécurité structurale (vérification type 4 : fatigue)			
	Classe	n	Vérification
Poutre maîtresse	C3	> 1.02	par rapport à la limite de fatigue
	E5	> 1.56	par rapport à la catégorie de fatigue
Entretoise	C3	> 1.28	par rapport à la limite de fatigue
	E5	> 1.02	par rapport à la limite de fatigue
Longeron	E5	> 1.18	par rapport à la limite de fatigue
Maçonnerie en pierre naturelle : sécurité structurale			
Piles et culée	E5	≅ 9	vérification type 2
Culée avec appui fixe	E5	1.12	vérification type 1 (stabilité)

C

Fig. 5 : Construction métallique : coupe du treillis multiple

Fig. 6 : Voie ferroviaire ouverte : le longeron repose sur l'entretoise de la poutre maîtresse.

Fig. 7 : Culée de pont : transition entre la structure rivetée et la maçonnerie
(Sauf mention, tous les documents illustrant cet article ont été fournis par l'auteur.)

jour avec des voies fixes sur des ponts. Finalement, ce sont les variantes consistant à remplacer la voie actuelle par une construction similaire ou à remettre en état la voie existante, avec des longerons reposant sur des appuis amortissant, qui se sont avérées les plus intéressantes.

L'état actuel de la protection contre la corrosion permet d'envisager deux options. La première consisterait en une prochaine intervention légère pour appliquer, après la réparation des quelques zones présentant une corrosion active, une nouvelle couche de finition sur l'ensemble de la construction. La seconde option, qui pourrait être mise en place dans une

quinzaine d'années environ et a un coût estimé de 30% plus élevé que la première, serait de procéder à un renouvellement complet du revêtement après suppression de l'ancien.

Il est aujourd'hui nécessaire de remplacer les appareils d'appui à rouleaux par des appuis glissants modernes permettant de garantir des conditions d'appui bien déterminées à la superstructure rivetée, ceci afin d'éviter d'engendrer des contraintes supplémentaires dans la construction en fer puddlé. L'installation d'appuis glissants est possible sans modifier le concept d'appui original du pont.

La remise en état de la maçonnerie en pierre naturelle comprend la reconstitution de joints (en particulier le mortier de finition), la réparation de quelques pierres et un nettoyage. En revanche, les cavités à l'intérieur des piliers ne doivent pas être injectées. Le bon état général de la maçonnerie permet en outre de renvoyer de 20 à 30 ans les interventions sous l'eau.

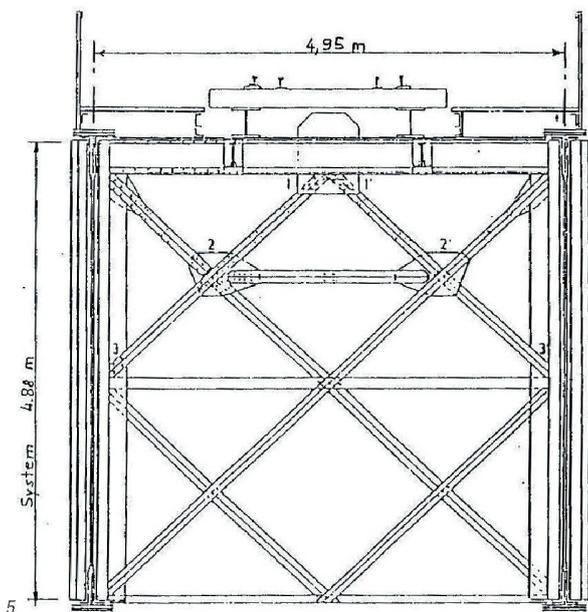
Comparaison économique de stratégies de maintenance

L'estimation des coûts pour effectuer les quatre types d'interventions en 2015 aboutit à un total de 1,8 million d'euros (y compris les coûts des services ferroviaires et les coûts d'exploitation d'un bus pendant la fermeture du pont pour l'intervention sur la voie). Ces coûts sont relativement raisonnables, notamment quand on les compare à l'estimation de 8,2 millions d'euros nécessaires pour un nouveau pont avec remplacement de la superstructure métallique.

En plus des coûts directement liés aux interventions de maintenance, ceux pour la surveillance et l'entretien courant ont aussi été estimés. Avec ces données, deux stratégies de maintenance sur une durée d'utilisation de 80 ans ont été développées, comme préconisé par la norme SIA 269. La première stratégie consiste à remettre entièrement à jour le pont en 2015, avec comme avantage de réduire considérablement les dépenses pour la surveillance et l'entretien pendant la durée d'utilisation. Dans la seconde stratégie, les interventions de remise en état ne sont effectuées que lorsque l'état de la construction l'exige, sans qu'aucune amélioration pour réduire les dépenses ultérieures de surveillance et d'entretien ne soit effectuée.

Le calcul économique a été effectué selon la méthode de la valeur actuelle⁵ avec un taux d'intérêt de 5% (souvent appliqué par les CFF). La 2^e stratégie s'est avérée être plus économique (avec une valeur actuelle inférieure d'environ 30% à celle de la 1^{ère} stratégie) et a donc été adoptée.

⁵ Une méthode qui permet de quantifier aujourd'hui des investissements futurs à partir d'un taux d'intérêt

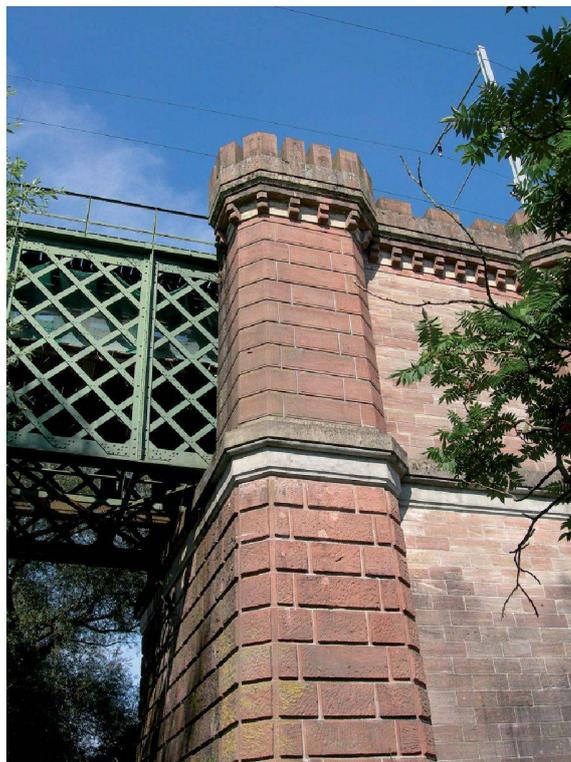


Des normes qui préservent le patrimoine

Cette étude montre que les exigences du trafic ferroviaire moderne, le critère économique des compagnies ferroviaires ainsi que la protection des monuments peuvent se réunir pour favoriser des solutions efficaces. Le pont-rail à Koblenz restera encore longtemps en service, à la fois comme un objet fonctionnel et comme témoin de l'art de l'ingénierie.

L'étude a de plus montré que les futures normes SIA 269 et ss constituent un référentiel pertinent et complet, avec des indications concrètes pour l'actualisation des actions et résistances d'une structure existante spécifique. Ces normes comportent la base et les approches nécessaires pour un traitement économique et conforme à l'état des connaissances des structures existantes, tout en respectant leurs valeurs matérielle et culturelle.

Eugen Brühwiler, professeur EPFL, dr ing. civil EPFZ
Président de la commission de norme SIA 260
Membre du comité de pilotage SIA 269
Ch. de Chantemerle 12, CH – 1132 Lully VD



7

Logiciel gratuit

Développé pour la Suisse

Les rusés utilisent CreaPlan!

Dimensionnement de revêtement – simple et rapide

Profitez du nouveau logiciel pour le dimensionnement des pavages en béton!
Déterminez de façon simple et rapide la structure des couches de fondation et du pavé en béton en fonction du type de sol, de la classe de charge du trafic et du taux d'infiltration.

CreaPlan a été spécialement développé pour la Suisse et correspond aux nouvelles normes VSS SN 640 480a «Pavages» et SIA 318 «Aménagements extérieurs».

Intéressé? Visionnez aujourd'hui encore la vidéo de démonstration et demandez le logiciel gratuit sous www.creabeton-materiaux.ch (rubrique «Pour le jardin»). Ou appelez-nous au tél. 026 668 95 95.

CREABETON

www.creabeton-materiaux.ch