

Résistance des ponts sous rails en béton armé essais de poutres aux flexions répétées

Autor(en): **Vallette, R.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **IABSE publications = Mémoires AIPC = IVBH Abhandlungen**

Band (Jahr): **8 (1947)**

PDF erstellt am: **30.04.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-8897>

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.

RÉSISTANCE DES PONTS SOUS RAILS EN BÉTON ARMÉ

ESSAIS DE POUTRES AUX FLEXIONS RÉPÉTÉES

FESTIGKEIT VON EISENBAHNBRÜCKEN IN EISENBETON
WIEDERHOLTE BIEGUNGSVERSUCHE AN TRÄGERN

ENDURANCE OF REINFORCED CONCRETE RAILWAY BRIDGES
TESTS OF BEAMS WITH REPEATED BENDING

R. VALLETTE,
Ingénieur principal de la S. N. C. F., Paris.

Le présent mémoire expose les études et les essais effectués par la Société Nationale des Chemins de fer Français pour déterminer la tenue des ponts en béton armé sous la circulation des trains lourds à grande vitesse.

Ponts sous rails en béton armé.

Outre le métal et la maçonnerie, la S. N. C. F. a largement utilisé le béton armé pour ses constructions récentes d'ouvrages d'art. Des ouvrages-types : ponts-dalles, ponts à poutres sous rails, pour petites et moyennes portées, ont été créés et couramment appliqués, et de grands ouvrages en arc ont été établis.

Le Service de la Construction de la S. N. C. F. pensait bien poursuivre dans cette voie pour le rétablissement massif des ouvrages détruits en 1944, mais des craintes avaient été exprimées sur la tenue des ponts en béton armé courant soumis au passage intensif des trains; il fallait les prendre en considération.

Ces craintes avaient pour fondement :

1^o Les fissures du béton tendu, qui pouvaient s'étendre progressivement sous les flexions répétées et qui, se fermant et s'ouvrant, pouvaient amener une usure du béton et permettre la corrosion des armatures.

2^o La situation du béton entre deux fissures, béton sollicité à la traction, au cisaillement, à l'adhérence sur armatures, à des taux élevés, et qui pouvait alors subir des déformations irréversibles amenant le décollement des armatures, le fractionnement du béton et la destruction de l'ouvrage.

3^o Les actions dynamiques, d'ailleurs mal connues, pouvaient aggraver cette situation.

Ces hypothèses sur les désordres dont étaient menacés nos ouvrages pouvaient d'autant moins être négligées que, pour vérifier la résistance des ouvrages anciens sous la charge du nouveau train-type 1944 à essieux de 25 t, on comptait accepter une majoration de 20 % des contraintes admissibles réglementaires (comme en matière de ponts métalliques (1)).

Les risques signalés auraient donc encore été accrus; on ne pouvait accepter sans étude une telle situation ni demeurer dans l'incertitude à cet

égard. C'est dans ces conditions que le Directeur du Service Technique des Installations Fixes demanda à sa Division des Ouvrages d'Art de faire une mise au point de la question.

Etat de la question.

Ouvrages anciens. La tenue des ouvrages en service constituait un premier facteur rassurant. Une visite spécialement faite n'avait rien révélé quant aux désordres signalés. D'autre part, les efforts dynamiques, mesurés avec un appareil optique spécialement établi (2) étaient conformes à ceux pris en compte dans les calculs.

Mais ces faits, pour favorables qu'ils fussent, n'étaient pas suffisamment probants, puisqu'une majoration des surcharges était envisagée et qu'on pouvait se trouver à la limite des détériorations citées; il fallait poursuivre l'étude plus avant.

Fissuration. Les nombreuses études faites sur la fissuration apportaient quelque lumière, mais aussi des résultats très divers.

CONSIDÈRE avait trouvé en 1903 (3) que le béton subissait sans dommage des allongements considérables dépassant $\frac{1,5}{1000}$ et que, sous 139 000 flexions successives, des allongements réversibles allant de 0,9 à $\frac{1,4}{1000}$ avaient été produits sans fissuration (béton étiré).

Par contre, d'autres essais (4) montrent que des pièces tendues en béton armé se sont fissurées comme le béton non armé.

Pour les poutres fléchies, on dispose de nombreux résultats: essais remarquables de M. DUMAS (5 et 6), essais de M. THOMAS (7) accusant une fissuration du béton pour des contraintes dans l'acier inférieure à 10 kg (allongement inférieur à $\frac{0,5}{1000}$). Des fissures de retrait pur peuvent même exister sans effort dans les hautes poutres non armées spécialement et nous avons nous-mêmes observé de telles fissures en lunule, très ouvertes, et s'arrêtant aux armatures, dans des poutres de chemin de roulement (Ateliers de Saintes).

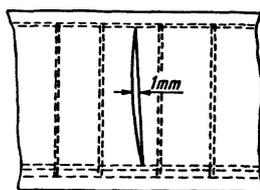


Fig. 1.

Fissure en lunule dans les hautes poutres sans armature d'âme — Stichelförmiger Riß in hohen Trägern ohne Stegarmierung — Crescent-shaped crack in high trusses without reinforcement of the web.

La question, qui apparaît ainsi comme assez complexe, semble élucidée par les essais de M. L'HERMITE (8), qui montrent que le béton intéressé par la déformation des armatures se limite à une gaine assez étroite autour d'elles. Tous les résultats précités s'expliquent alors aisément: non-fissuration des pièces à faible enrobage (le béton s'étire avec l'acier), ou de pièces courtes à grand enrobage avec traction agissant directement sur l'armature (le béton n'est pas sollicité en surface); au contraire, fissuration

rapide des pièces ou des poutres à grand enrobage, quand la traction agit sur le béton (en dehors de la zone d'influence de l'armature), etc.

Tenue sous les charges répétées.

CONSIDÈRE rend compte (9) de l'état, en 1903, d'une traverse de chemin de fer en béton armé posée en 1892 et restée 5 ans en service; elle ne présentait pas de désagrégation, le béton (ciment de 1892) avait une résistance de 592 kg à l'écrasement et les barres légèrement ondulées n'ont cédé à l'adhérence qu'à un taux de 85 kg rapporté à la surface enrobée.

Les essais de CONSIDÈRE aux flexions répétées sont notés ci-dessus.

D'autres essais de même sorte ont été effectués depuis et, en dernier lieu, ceux rapportés au Congrès de 1936 en même temps que des essais de pièces en béton armées avec des aciers à haute résistance.

Les résultats obtenus ont abouti à la résolution du thème II du Congrès de 1936, qui résume l'état de la question à cette date (10).

Cette résolution, qui marque que la sécurité à la fissuration est assurée pour un travail des armatures de 18 kg sous charges statiques, est plus réservée pour les charges mobiles et, pas plus que les autres faits notés, elle n'apporte la réponse aux inquiétudes, formulées au début, en ce qui concerne la désorganisation possible du béton fissuré sous les flexions répétées. Aussi, au terme de cet examen, le Directeur du Service décida-t-il d'entreprendre des expériences soumettant le béton directement aux sollicitations incriminées. Ce sont les résultats de ces expériences, qui n'ont pas leur correspondance dans les essais antérieurs, qui vont être analysés.

Programme.

Les essais furent exécutés au Laboratoire du Bâtiment et des Travaux Publics, sous la conduite de son Directeur M. L'HERMITE; avec le programme suivant:

1^o Charge statique.

Détermination précise de la fissuration sur divers types de poutres, en fonction des efforts mesurés et calculés, sous l'action de charges statiques croissantes poussées jusqu'à rupture, avec variation brusque d'effort tranchant.

2^o Charges répétées.

Sollicitation des poutres dans les mêmes conditions, sous des séries de charges et décharges, fissuration comparée, observation éventuelle des glissements d'armatures et des autres effets, essais conduits jusqu'à la rupture des poutres.

Types de poutres.

Les types essayés sont indiqués ci-après (fig. 2).

Béton.

Dosage: 400 kg, vibré, résistance: 400 kg à l'écrasement au moment des essais.

Acier.

Limite d'écoulement: 31 kg, rupture: 43 kg.

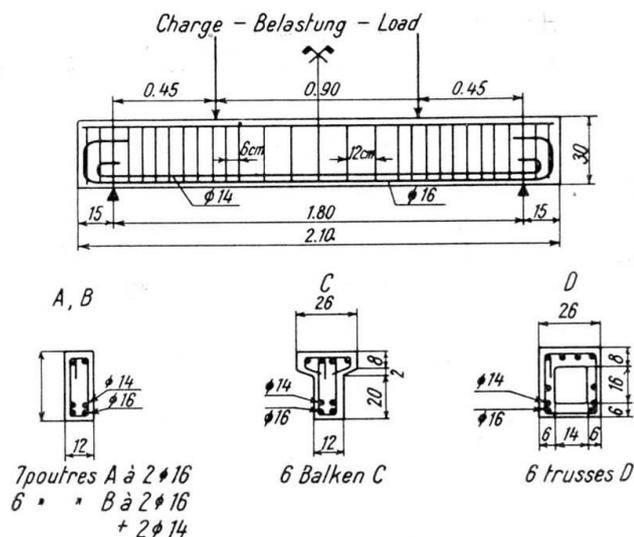


Fig. 2.

Type des poutres essayées — Typus der Versuchsbalken — Type of experimental trusses

Analyse des résultats.

Charges statiques. Les essais sous charges statiques devaient servir de base aux essais sous charges répétées; ils avaient pour but de déterminer d'une façon précise l'état de fissuration du béton en fonction des contraintes dans l'acier.

Les fissures étaient observées et mesurées à la loupe micrométrique (fig. 3).

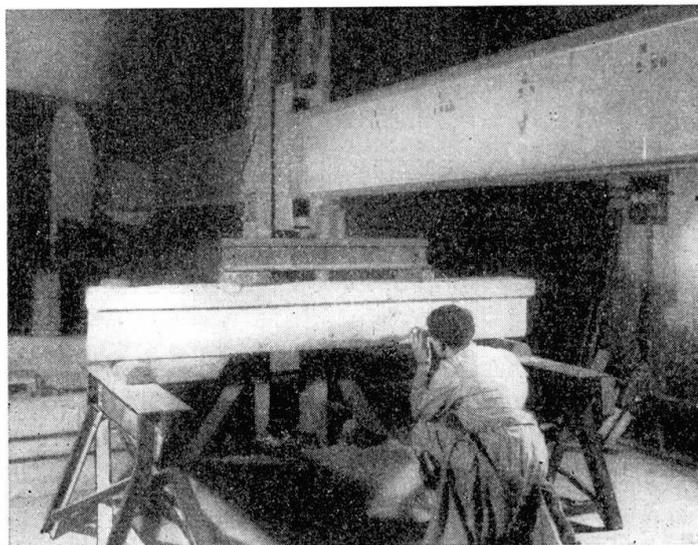


Fig. 3.

Examen et mesure de fissures à la loupe micrométrique — Prüfung und Messung der Risse mit Lupe — Examining and measuring cracks with the micrometric lens.

Les contraintes réelles du béton et des aciers étaient mesurées par la méthode de cordes sonores, les cordes étant établies sur des plots scellés dans le béton ou soudés sur les barres, avec correction éventuelle de la flexion des plots. Les mesures ont été faites sur 9 poutres des divers types.

Par rapport aux contraintes théoriques dans l'acier, les valeurs mesurées leur sont inférieures pour les faibles contraintes, surtout pour le type A peu armée (4,7 kg au lieu de 8,6), mais sont peu différentes pour les taux dépassant 13 kg pour tous les types.

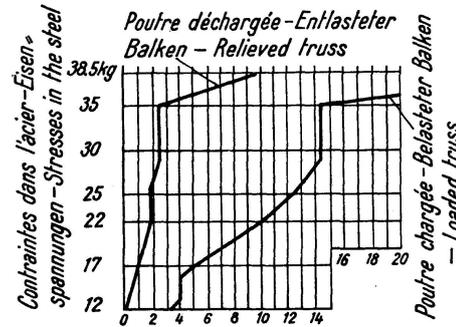


Fig. 4.

Ouverture d'une fissure centrale sous la charge. Largeur des fissures en $\frac{1}{100}$ mm — Öffnung eines mittleren Risses unter der Belastung. Rißbreite in $\frac{1}{100}$ mm — Opening of a central crack under load. Breadth of cracks in $\frac{1}{100}$ mm.

Les premières fissures perceptibles ($\frac{2}{100}$ mm) se sont produites pour des taux dans l'acier d'environ 8,6 kg, type A, 8 kg type B, 11 kg type C, 9,4 kg type D, mais pour les charges plus élevées, la fissuration présenta la même importance dans tous les types de poutres; on ne peut donc établir une distinction entre eux à ce sujet. Les fissures ne sont perceptibles après déchargement que pour des taux de 14 kg 5 (type A) et 17 kg 5, type C (fissure en charge: 2 à $\frac{5}{100}$ mm). Elles n'atteignent $\frac{10}{100}$ mm en charge que pour des taux de 22 kg (2 à $\frac{5}{100}$ après déchargement). Enfin, elles ne sont encore que de $\frac{15}{100}$ pour 31 kg et ne deviennent très ouvertes qu'après dépassement de la limite élastique (fig. 4 et 5). La contrainte mesurée dans le béton comprimé était alors de 200 kg/cm^2 .

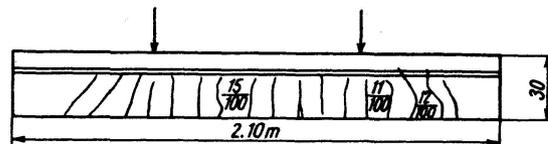


Fig. 5.

Charges statiques. Fissure d'une poutre C au moment de la rupture — Statische Belastungen. Riß eines Balkens C beim Bruch — Static loading. Crack in a C truss and rupture.

On remarque ainsi que, si les fissures débutent assez vite (l'enrobage de 25 mm étant à la limite de la zone d'influence de l'acier), elles se maintiennent peu ouvertes jusqu'à l'affaissement de la poutre et ne peuvent avoir aucune conséquence. Le béton situé contre l'armature s'allonge avec elle et a ses fissures encore plus réduites. Vers les appuis, on trouve les fissures caractéristiques d'effort tranchant normales aux tractions principales.

Flexions répétées.

Les essais sous charges variables avaient une grande importance; ils pouvaient conduire à la condamnation des ouvrages en béton armé sous

rails, ou à la limitation de leur emploi. Aussi, furent-ils faits de façon à fournir des résultats indiscutables, les charges produisant des variations brusques d'effort tranchant et les poutres présentant les caractéristiques des ouvrages courants quant aux valeurs relatives des contraintes de traction de l'acier et d'adhérence et de cisaillement du béton.

Les essais portèrent sur 4 poutres, 2 du type *C* et 2 du type *D*, ils comportaient 30 000 variations de charges à l'heure, avec un maximum de 3×10^6 environ (100 heures).

Les résultats bruts sont indiqués au tableau suivant, en exprimant la charge maxima appliquée par la valeur de la contrainte qu'elle produisait dans l'armature inférieure. La charge minima étant par ailleurs réglée pour produire une contrainte de $5,5 \text{ kg/mm}^2$ pour tous les essais.

Type de poutre	Contrainte de l'armature kg/mm^2	Nombre de charges $10^6 \times$	Fissures, ouverture en charge. mm		Observations
			maxima	minima	
<i>C</i> ₁	11	3	0,05	0	
	20	3,1	0,1	0,05	
<i>C</i> ₂	28	2,6	0,03 à 0,10	0,05	Rupture des aciers par fatigue (adhérence 4,2 à $21,6 \text{ kg/mm}^2$)
<i>D</i> ₁	20	3	0,08 à 0,15	0,03 à 0,10	
	28	2,65			
<i>D</i> ₂	31	0,93	0,15 à 0,2	0,03 à 0,10	Rupture des aciers par fatigue (adhérence 4,2 à 24 kg/mm^2)

Quelques fissures se sont ouvertes dans la poutre *C*₁ dès les premières applications de charge, exactement comme pour la charge statique; elles se sont un peu étendues les premières heures et sont restées sans changement ensuite pendant toute la durée de l'essai (100 heures) (fig. 6).

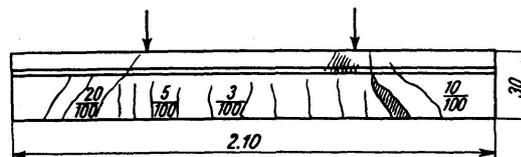


Fig. 6.

Charges répétées. Fissure d'une poutre *C* au moment de la rupture — Wiederholte Belastungen. Riß eines Balkens *C* beim Bruch — Dynamic loading. Crack in a *C* truss at rupture.

On retrouve d'autre part, sur le tableau ci-dessus, pour les mêmes contraintes, les mêmes ouvertures données ci-dessus pour les charges statiques; la répétition des charges n'a amené aucun accroissement des fissures ni en nombre, ni en étendue, ni en largeur, le maximum d'ouverture atteint sous charge fut de 0,2 mm pour une contrainte de 31 kg dans l'acier.

Les essais à outrance se sont terminés par la rupture des armatures tendues, rupture sans déformation plastique et présentant bien le caractère d'une rupture de fatigue par tractions répétées (fig. 7).

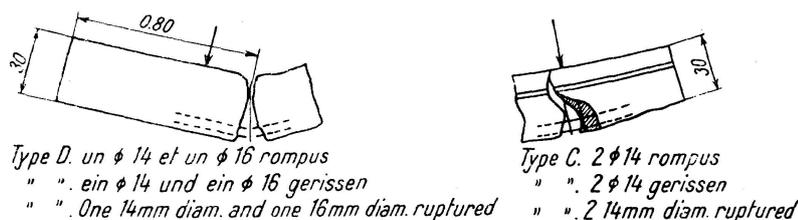


Fig. 7.

Poutres soumises aux flexions répétées, après rupture des aciers par fatigue — Balken unter wiederholten Biegebungsbeanspruchungen, nach erfolgtem Ermüdungsbruch der Eisen. — Trusses subjected to dynamic bending stresses, after failure of the steel through fatigue.

L'observation la plus attentive en cours d'essai n'a révélé aucun indice d'une cession quelconque du béton, ni glissement de barre, ni cisaillement, ni désagrégation du béton, d'ailleurs, de tels défauts auraient entraîné des désordres très visibles et la désorganisation de la poutre. Ces résultats sont remarquables si l'on considère que les taux d'adhérence entre deux fissures variaient effectivement entre 4,2 kg et 24 kg et les taux de cisaillement entre 6,6 et 37 kg, c'est-à-dire bien au-delà des taux pratiques.

Conclusion

On peut tirer de ces essais des conclusions très nettes, qui mettent au point la question de la résistance des ouvrages en béton armé sous charges mobiles et qui complètent ainsi la résolution du thème II du Congrès de 1936.

Fissuration

Les fissures qui se produisent dans les poutres en béton armé, soumises à des flexions répétées, même pour des tractions dans l'acier dépassant 28 kg/mm², sont sans conséquence pour la tenue de l'ouvrage.

Rien ne s'oppose donc, à ce point de vue, à l'emploi de l'acier à haute résistance dans les ouvrages courants soumis à des charges mobiles.

Adhérence — Cisaillement

Les ouvrages de constitution courante supportent les charges répétées sans affaiblissement de l'adhérence béton-armature ni de la résistance au cisaillement et sans usure des parties fissurées, ni désorganisation du béton.

On peut donc bien, comme le fait le règlement français, appliquer les mêmes contraintes, quelle que soit la nature de la surcharge, le coefficient de majoration dynamique ne caractérisant que l'augmentation effective de la charge.

Endurance

Il y a lieu de faire état de la limite d'endurance des matériaux pour les ouvrages réellement sollicités à la fatigue. Ce n'est pas le cas des ponts.

Ces conclusions ont permis au Service de la Construction de la S.N.C.F. de décider en toute assurance l'exécution de nombreux ouvrages de toute importance en béton armé courant, entre autres :

Arcs sous tablier de Nogent, sur la Marne (65 et 75 m), de Tarascon, sur le Rhône (60 m), de l'Erdre (95 m).

Arc à tablier suspendu de Chasse, sur le Rhône (128 m).

Poutres diverses allant jusqu'à 40 m de portée.

Résumé

La tenue des ponts-rails en béton armé, et surtout des ponts anciens, sous les circulations lourdes à grande vitesse envisagées sur les Réseaux français, présentait quelque incertitude: usure du béton fissuré; rupture d'adhérence du béton enrobant les armatures et sollicité à la fois à la traction et au cisaillement à des taux élevés, des déformations irréversibles du béton étiré pouvant amener son décollement; détachement du béton divisé par les fissures, phénomènes entraînant finalement la ruine des pièces.

On ne pouvait rester devant ce doute et la S.N.C.F. décida d'entreprendre des essais directs pour mettre cette question au point, aucun essai antérieur n'y répondant.

Ce sont ces essais qui sont relatés ici:

Essais sous charges fixes faisant apparaître assez rapidement des fissures multiples, mais fixant aussi sur leur peu d'ouverture, même pour des contraintes des armatures atteignant 30 kg/mm^2 .

Essais aux flexions répétées ne révélant aucun phénomène particulier par rapport aux essais précédents, les mêmes fissures apparaissant dans les mêmes conditions et se stabilisant après un léger accroissement; il n'y a ni usure du béton, ni décollement d'armature, ni aucune désagrégation, même dans l'essai à outrance déterminant la rupture des aciers par fatigue.

Ces résultats sont absolument nets et fixent la question.

On peut conclure:

1^o que les ouvrages courants armés en acier doux possèdent bien sous charges mobiles, comme sous charges fixes, pour tous les genres d'effort, la sécurité prévue par les règlements;

2^o qu'il en est de même pour les ouvrages à armature à haute résistance et normalement conçus, où seule la contrainte dans l'acier est notablement relevée, la seule différence consistant dans un accroissement de la fissuration, qui reste néanmoins faible et sans conséquence;

3^o La seule réserve à faire concerne les ouvrages très spéciaux effectivement soumis à des variations de charge à haute fréquence, pour lesquels il y aurait lieu de faire état de la limite de rupture des armatures à la fatigue.

Zusammenfassung

Die Bewährung der Eisenbahnbrücken in Eisenbeton, besonders derjenigen älteren Datums, bereitete wegen den schweren Belastungen und den hohen Geschwindigkeiten, wie sie im französischen Eisenbahnnetz gebräuchlich sind, einige Bedenken: Abnutzung des Betons in den Rissezonen, Bruch durch Überwindung des Gleitwiderstandes in denjenigen Betonzone, wo der Beton gleichzeitig auf Zug und Schub in hohem Maße beansprucht wird; Gefahr des Loslösens des Betons bei plastischer Formänderung in der Zugzone oder infolge der Auflockerung durch Rissebildungen, alles Erscheinungen, die zur Zerstörung der einzelnen Teile führen können.

Diese Unsicherheit mußte beseitigt werden, und die S.N.C.F. beschloß, direkte Versuche auszuführen, um diese Frage abzuklären, da frühere Versuche diesbezüglich nicht maßgebend waren.

In der vorstehenden Abhandlung werden diese Versuche beschrieben:

Versuche bei ruhender Belastung, die ziemlich rasch zahlreiche Risseerscheinungen zur Folge haben, jedoch die Geringfügigkeit der Ribbreite selbst bei Eisenspannungen von 30 kg/mm^2 aufweisen.

Biegungsversuche unter wiederholter Belastung, die gegenüber den statischen Versuchen keine besonderen Erscheinungen aufweisen, da dieselben Risse unter denselben Bedingungen auftreten und nach einer kleinen Steigerung stabil bleiben; weder ist eine Abnutzung des Betons noch ein Loslösen desselben von der Bewehrung oder irgendeine Zerfallserscheinung festzustellen, selbst nicht bei der Tragfähigkeitsprobe, bei der die Eisen infolge Ermüdungsbruch zu Grunde gingen.

Diese Versuche sind klar und eindeutig und entscheiden die Frage.

Daraus ist zu schließen:

1. daß die üblichen Bauwerke mit Flußeisenbewehrung bei beweglicher und ruhender Belastung für alle Beanspruchungsarten die in den Vorschriften vorgesehene Sicherheit besitzen;

2. daß ein Gleiches bei Bauwerken mit hochwertiger Bewehrung und bei sachgemäßer Konstruktion gilt, wo nur die Eisenspannung bedeutend erhöht ist; der einzige Unterschied besteht in einer Zunahme der Rissebildung, die jedoch unbedeutend und ohne Folgen bleibt;

3. der einzige Vorbehalt betrifft Sonderausführungen, die tatsächlich einem sehr häufigen Lastwechsel unterliegen, für welche die Bruchgrenze bei Ermüdung der Bewehrung zu berücksichtigen ist.

Summary

The endurance of railway bridges constructed of reinforced concrete, and especially of older bridges, has given rise to some doubts because of the heavy loading and the high speeds usual on French railways: Wear and tear of the concrete in the crack zones, rupture because of the resistance to sliding being exceeded in zones where the concrete is to a large extent stressed simultaneously in tension and in shear; danger of the concrete becoming loose with plastic deformation in the tension zone or in consequence of crumbling through the formation of cracks, all phenomena which may lead to the destruction of the separate parts.

This uncertainty had to be removed and the SNCF decided to carry out direct tests in order to clear these questions up, since the results of former tests were not applicable to them.

In the present paper these tests are described. Tests with stationary loading, which fairly quickly gave rise to numerous appearances of cracking, although the width of the cracks was slight, even with stresses of 30 kg/mm^2 in the reinforcement.

Dynamic bending tests, which in contrast to the foregoing tests gave rise to no special manifestations, since the same cracks appeared under the same conditions and remained stable after a small increase; no wear and tear was determined in the concrete, nor any working-loose of the concrete from the reinforcement, nor any appearance of failure, even at carrying-capacity tests, where the reinforcement failed because of rupture due to fatigue.

The results of these tests are clear and definite and settle the question.

From them it is to be concluded:

1. that the usual structures with mild steel reinforcement possess the safety prescribed in the regulations for all kinds of stressing and for rolling or stationary loads;
2. that the same holds good in the case of structures with particularly good reinforcement and when appropriately designed, where only the stressing in the steel is considerably increased; the only difference consists in an increase in the crack formation, but that remains insignificant and without any consequences;
3. the sole reservation concerns special constructions which are actually subjected to very frequent alteration of load; in such cases the ultimate stress limit with fatigue of the reinforcement has to be considered.

References

1. Etude sur les vieux tabliers en fer. Deuxième volume des Mémoires de A. I. P. C.
2. Ponts-rails en béton armé. „Travaux“ de mai 1944.
3. Compte rendu de l'Académie des Sciences du 12 décembre 1898.
4. MOENAERT. „Travaux“ de mars 1944.
5. DUMAS. Annales des Ponts et Chaussées 1931.
6. DUMAS. Congrès de l'A. I. P. C. 1932.
7. THOMAS. Congrès de l'A. I. P. C. 1936.
8. L'HERMITE. Circulaire de Bâtiment et des Travaux Publics. 1943.
9. Considère. Rapport de la Commission du béton armé. 1906.
10. Compte rendu du Congrès de 1936.