Zeitschrift: IABSE congress report = Rapport du congrès AIPC = IVBH Kongressbericht

Band: 2 (1936)

Artikel: La réduction des contraintes thermiques dans les constructions métalliques soudées

Autor: Dörnen, A.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-3049

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: 02.07.2025

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

IIIb 7

La réduction des contraintes thermiques dans les constructions métalliques soudées.

Verminderung der Wärmespannungen in geschweißten Stahlbauten.

The Reduction of Thermal Stresses in Welded Steelwork.

Dr. Ing. A. Dörnen,
Dortmund-Derne.

Les *contraintes thermiques* dans les constructions métalliques soudées se composent des *contraintes de laminage,* engendrées dans les différentes barres par le laminage, et des *contraintes de soudage* qui s'ajoutent par suite du soudage. Ces contraintes s'additionnent. Deux problèmes en résultent:

1° Réduire à un minimum les contraintes thermiques dans les ouvrages métalliques soudés,

2° Déterminer si les inévitables contraintes thermiques mettent en danger la résistance des constructions métalliques soudées.

Les *contraintes de laminage* existent dans tous les profilés laminés, même dans les ronds, elles résultent de l'inégalité du refroidissement. Le noyau d'une barre ronde refroidie est soumis à la traction et l'enveloppe à une compression correspondante. Après le laminage, la barre se refroidit de l'extérieur vers l'intérieur, l'enveloppe est donc froide avant le noyau. Au début le noyau est encore plastique et suit le retrait de l'enveloppe, sans être mis sous tension. L'enveloppe se durcit et ne peut alors plus suivre plastiquement le retrait du noyau. Elle est donc soumise à une compression élastique qui, après le refroidissement, correspond à une traction élastique dans le noyau. Il est simple de contrôler ces rapports de tension par des essais:

Si l'on tourne par ex. un rond laminé de 80 mm d'épaisseur et 1000 mm de longueur jusqu'à 30 mm de diamètre, on libère le noyau soumis à la traction de l'enveloppe qui empêche sa contraction et le noyau se raccourcit de 0,15 mm. Cela correspond à une contrainte moyenne de laminage de 300 kg/cm² dans le noyau.

Un recuit permet de réduire les contraintes de laminage mais non pas de les éliminer car, lors du refroidissement qui suit le recuit, on a les mêmes rapports que dans la barre encore rouge après le laminage. Les contraintes résiduelles dans la barre sont d'autant plus faible que le refroidissement est plus lent. L'essai suivant montre que même un recuit répété ne peut pas supprimer toutes les tensions dans une barre:

On a porté 63 fois au rouge clair un rond laminé de 70 mm d'épaisseur et de

1000 mm de longueur en le laissant chaque fois lentement refroidir. Il s'est raccourci régulièrement de 26 mm. Lors du chauffage, l'enveloppe qui, comme nous l'avons dit ci-dessus, est, à froid, soumise à une compression élastique, devient plastique avant le noyau. Les contraintes de traction qui existent dans le noyau encore froid et élastique en ce moment refoulent l'enveloppe chaude et plastique. La barre devient donc plus courte et aussi plus épaisse. Après cette égalisation elle n'est sollicitée à aucun effort. Le refroidissement engendre dans la barre des contraintes thermiques dont la grandeur et la répartition sont les mêmes qu'après le laminage. Si l'on répétait cet essai un nombre assez grand de fois, la barre deviendrait finalement une sphère.

Dans les barres laminées de forme plus compliquée, les contraintes de laminage sont en général plus grandes que dans les simples ronds. J'ai déterminé dans l'âme de profilés NP 50 une compression provenant du laminage de 170 kg/cm² et dans l'âme de profilés à larges ailes $42^1/_2$ une compression atteignant même 1600 kg/cm².[1] Cette grande différence provient de la différence dans le rapport entre les ailes et l'âme. Dans la construction des ouvrages soudés il faut donc employer des profilés simples avec les plus faibles contraintes de laminage.

Lors du soudage, les *contraintes de soudage* s'ajoutent aux contraintes de laminage. Leur grandeur et leur extension dépend des moyens employés et de la suite du soudage.[2],[3] Toutes les autres conditions restant les mêmes, ces contraintes croissent avec la grandeur de la section des soudures. La section des cordons de soudure ne doit donc pas être plus grande qu'il n'est nécessaire. Il faut par conséquent préférer les soudures en X aux soudures en V car pour un angle d'ouverture de 90° et des pièces de même épaisseur, une soudure en X possède la même résistance qu'une soudure en V, avec une section de moitié plus petite (qui demande par conséquent la moitié moins de travail) et de plus faibles contraintes de soudage. En outre, l'excentricité des soudures en V produit des distorsions que l'on ne peut éliminer que rarement en plaçant de manière appropriée les pièces à assembler. Après le soudage il faut procéder à une rectification coûteuse et pas très avantageuse pour la pièce en question.

Dans des cordons de même section, les contraintes de soudage sont plus grandes lorsque l'on exécute la soudure en une seule passe au moyen d'une électrode épaisse que lorsqu'on la fait en plusieurs passes avec de minces électrodes. Il ne faudrait jamais employer des électrodes de plus de 8 mm de diamètre dans la construction métallique. D'autre part il ne faut pas descendre au-dessous de 4 mm sinon la fusion des fortes sections généralement employées dans la construction métallique n'est pas suffisante pour garantir une bonne pénétration.

Le soudage à pas de pélerin permet peut-être de réduire un peu les contraintes de soudage mais il faut tenir compte des nombreuses reprises et de leurs inconvé-

---

[1] Dr. Ing. *Dörnen:* „Schrumpfspannungen an geschweißten Stahlbauten". Der Stahlbau 1933, fasc. 3.

[2] Dr. Ing. *Schroeder:* „Zustandsänderungen und Spannungen während der Schweißung des Stahlbaues für das Reiterstellwerk in Stendal". Der Bauingenieur 1932, fasc. 19/20.

[3] Dr. Ing. *Krabbe:* „Entstehung, Wesen und Bedeutung der Wärmeschrumpfspannungen". Elektroschweißung 1933, fasc. 5.

nients. Par conséquent il faudrait souder régulièrement en une seule fois et à partir du milieu de la pièce vers les extrémités.

Dans un article publié en 1936[4] ainsi que dans son rapport, *Bierett* fait une distinction entre les contraintes de soudage naturelles et les contraintes de soudage additionnelles; il divise ces dernières en contraintes dues à une fixation interne et contraintes dues à une fixation externe. Les contraintes naturelles de soudage correspondent aux contraintes de laminage et doivent être étudiées les premières. En général elles ne sont pas plus grandes[5] que les contraintes de laminage et — d'après *Bierett* — pas du tout dangereuses, de même que ces dernières. Les contraintes additionnelles de soudage par fixation interne, proviennent de ce que le joint à souder est exécuté en différentes passes successives sur sa longueur et sa section; le métal d'apport fondu précédemment est déjà froid lorsqu'on applique de nouvelles passes. Ces contraintes sont tout spécialement critiques dans la racine des fortes soudures et peuvent facilement provoquer des fissures; dans ce cas, la soudure est défectueuse dans son noyau. On peut fortement réduire ces contraintes en martelant soigneusement les passes déjà froides et — ainsi que le recommande *Bierett* — en chauffant les parties déjà terminées de la soudure jusqu'à ce que la soudure ou tout au moins sa racine soit exécutée sur toute sa longueur. Pour les soudures très importantes, comme par ex. les soudures bout à bout des semelles tendues, je recommande de souder le cordon au delà des dimensions des semelles, de chauffer au rouge clair le joint des deux côtés sur une longueur de 25 cm et d'usiner le bourrelet de soudure aux dimensions des semelles — éviter les travaux sur du métal chauffé au bleu! —. De cette façon, non seulement on élimine toutes les contraintes additionnelles de soudage provenant de la fixation interne mais en outre on rend plus dense la structure de la soudure et l'on rend plus intime la liaison de la soudure au métal de base dans la zone de transition. Cette méthode permet d'introduire dans les joints de semelles, les joints d'âme et même dans les joints universels de poutres à âme pleine, un état de tension correspondant à peu prés à celui qui existerait si le tout avait été laminé en une seule fois. Les brûleurs à gaz se sont révélés très propres à ce genre d'opération; ils se composent de longs tuyaux avec une série de trous et on les place d'une manière adéquate sur la pièce à traiter. A l'atelier, les brûleurs sont alimentés par la conduite de gaz. Pour le chantier on peut employer soit du gaz comprimé soit du gaz liquide.

Les contraintes additionnelles de soudage par fixation externe se présentent lorsque les pièces à souder ne peuvent pas suivre le retrait de la soudure. Des mesures spéciales permettent d'éliminer ou de réduire fortement ces contraintes dans les types d'ouvrages que l'on soude le plus souvent à l'heure actuelle, c'est-à-dire les poutres, les arcs et les cadres à âme pleine, les poutres du type *Langer* ainsi que les poutres Vierendeel. C'est ce que nous exposerons ci-dessous pour résoudre le *premier* problème posé.

La poutre à âme pleine la plus simple et la meilleure se compose d'une âme

---

[4] Prof. Dr. *Bierett:* „Welche Wege weisen die Erkenntnisse über Schrumpfwirkungen den Arbeitsverfahren für die Herstellung von Stumpfnähten im großen Stahlbau?" Der Stahlbau 1936, fasc. 9.

[5] Dr. Ing. *Dörnen:* „Schrumpfspannungen an geschweißten Stahlbauten". Der Stahlbau 1933, fasc. 3.

et de deux semelles sans aucun joint sur toute la longueur de la poutre. Il suffit dans ce cas d'effectuer les soudures de gorge et de souder les raidisseurs. Si on le juge nécessaire on peut presque complètement éliminer des soudures de gorge les contraintes thermiques additionnelles dues à la fixation interne en chauffant à 400—500° chaque cordon sur toute sa longueur. Si l'on fait en sorte que les semelles puissent suivre sans résistance le retrait transversal des soudures de gorge on n'a aucune contrainte thermique additionnelle due à la fixation externe. Il est préférable de ne souder les raidisseurs que lorsque l'âme et les semelles sont soudées. Après le soudage des cordons de gorge l'âme est soumise d'abord à une compression qui est atténuée ou même transformée en traction par le soudage des raidisseurs, parallèlement ou perpendiculairement à l'axe de la poutre. Par le fait même, la traction qui existe dans les cordons de gorge et leurs environs

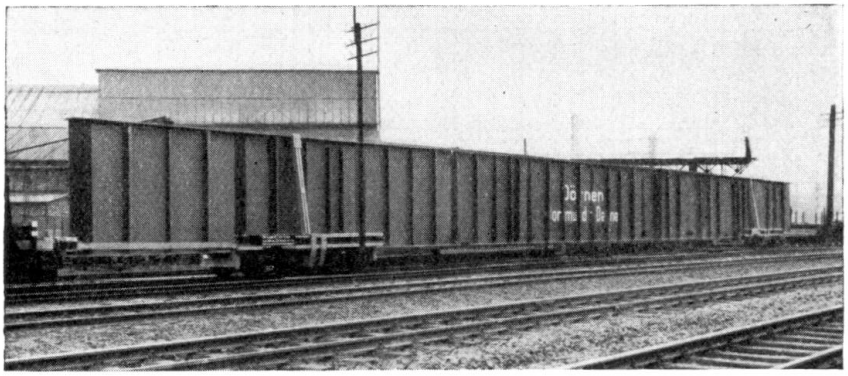

Fig. 1.

devient plus faible, surtout lorsque les extrémités des cordons de fixation des raidisseurs verticaux se trouvent suffisamment éloignées des cordons de gorge. Une épaisseur de 3 mm suffit pour les soudures verticales des raidisseurs. La simplicité de cette exécution est réduite lorsque les dimensions de la poutre dépassent certaines valeurs, soit en longueur, soit dans l'épaisseur des membrures. Les semelles trop épaisses ne sont pas à recommander car leur laminage présente des difficultés. Pour l'acier St. 37. 12, on ne devrait pas dépasser 50 mm. Lorsque l'on a besoin de semelles plus épaisses on se servira plus volontiers de plusieurs semelles, elles-mêmes si possible sans joints. Dans de pareils cas il faut d'abord souder l'âme à la seule semelle intérieure car les forces de traction longitudinales engendrées par le retrait des soudures de gorge sont, dans des cordons de même section, plus faibles lorsque les sections à assembler sont plus faibles et par le fait même plus compressibles. La traction est encore réduite par les soudures d'angle fixant les autres semelles. Il est préférable de souder les raidisseurs lorsque l'âme est soudée aux seules semelles intérieures.

Lorsque la poutre est trop longue, l'âme ou les membrures ou les deux auront des joints. En général il est préférable de joindre les âmes que les semelles. On soude d'abord (bout à bout) les âmes entre elles. Les soudures seront éventuellement libérées par chauffage des contraintes additionnelles dues à la fixation interne et étudiées aux rayons X. On évite des contraintes thermiques dues à la fixation externe en plaçant simplement les pièces l'une contre l'autre lors du soudage des cordons. On ne peut pas prétendre que cela empêchera toute fissu-

ration de la soudure soumise au retrait. La bonne qualité de toute soudure bout à bout dépend en premier lieu de la perfection de la racine qui ne doit pas

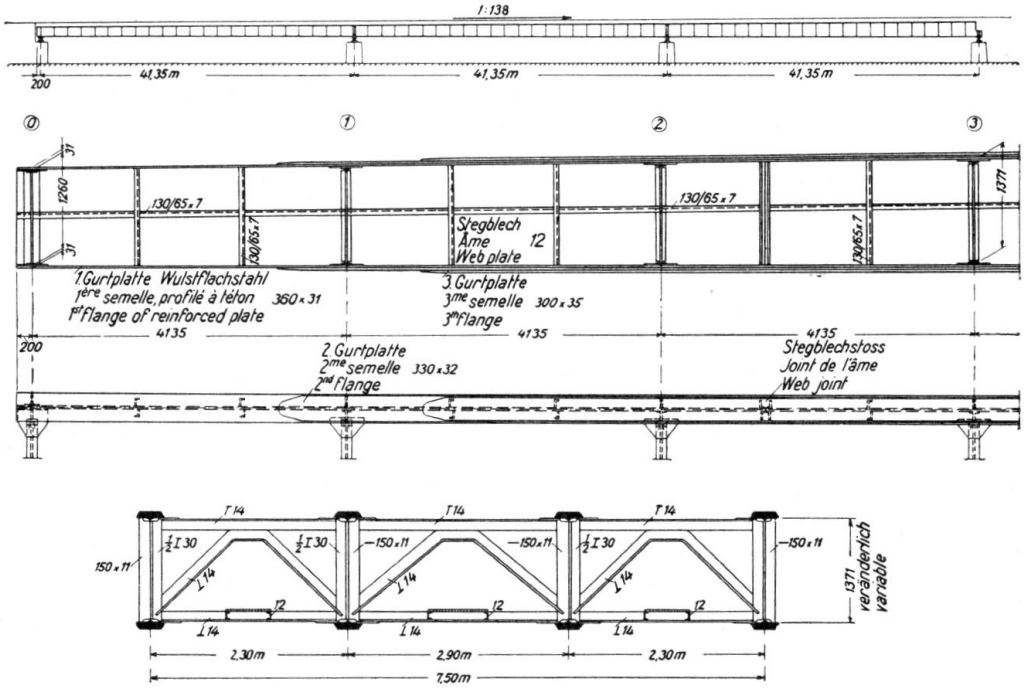

Fig. 2.

Poutres soudées.

présenter la plus fine fissure. On découpe ensuite les bords de l'âme conformément à la contre-flèche de la poutre, on prépare puis on exécute le soudage des

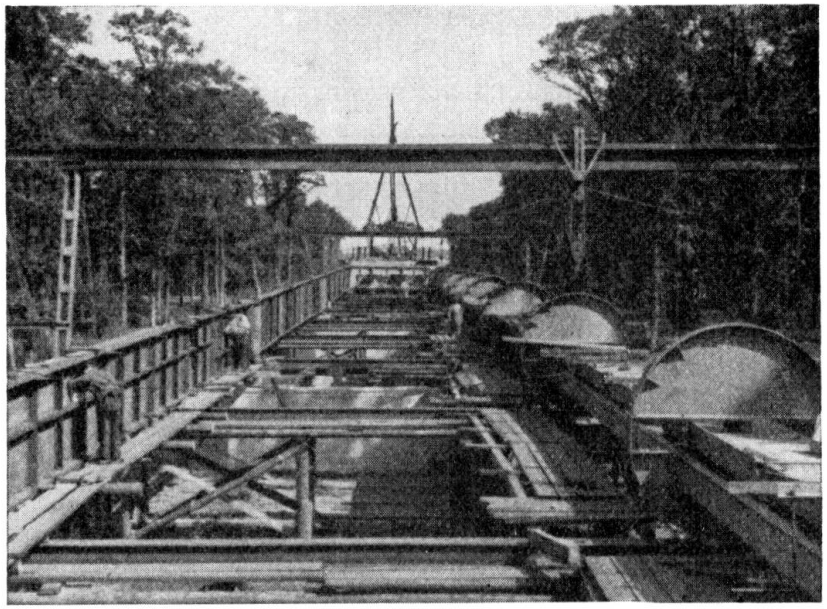

Fig. 3.

semelles. On applique les raidisseurs lorsque l'âme est soudée aux semelles intérieures. Il faut cependant éviter de placer les raidisseurs verticaux aux en-

virons des joints verticaux de l'âme afin que ces derniers ne soient pas trop fortement sollicités à la traction.

Si l'on ne peut plus éviter les joints dans les semelles, on soude chaque bande de semelles pour soi et alors seulement on les assemble à l'âme ainsi que nous

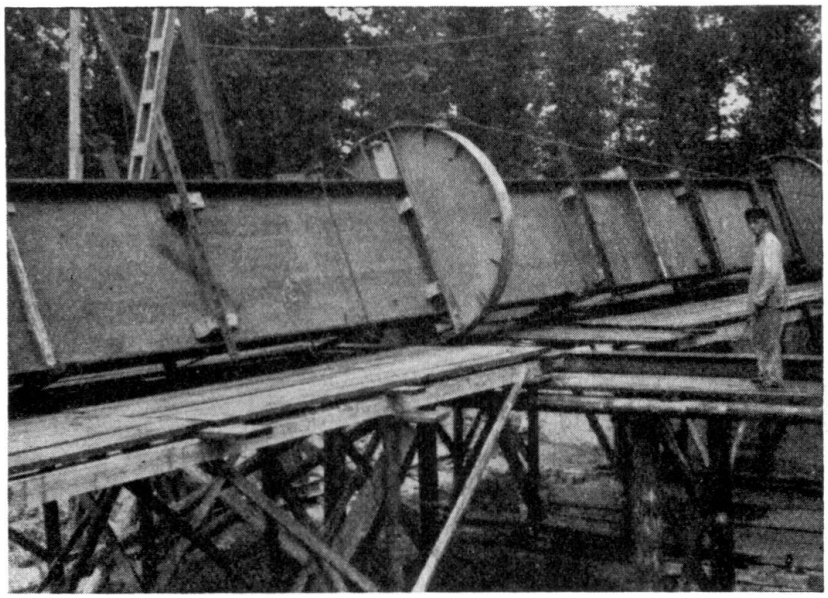

Fig. 4.

venons de l'exposer. Ce processus donne de si bons résultats que tout se passe comme si l'on n'avait aucun joint. Il faut au préalable éliminer par chauffage les contraintes thermiques additionnelles engendrées dans les joints des semelles par

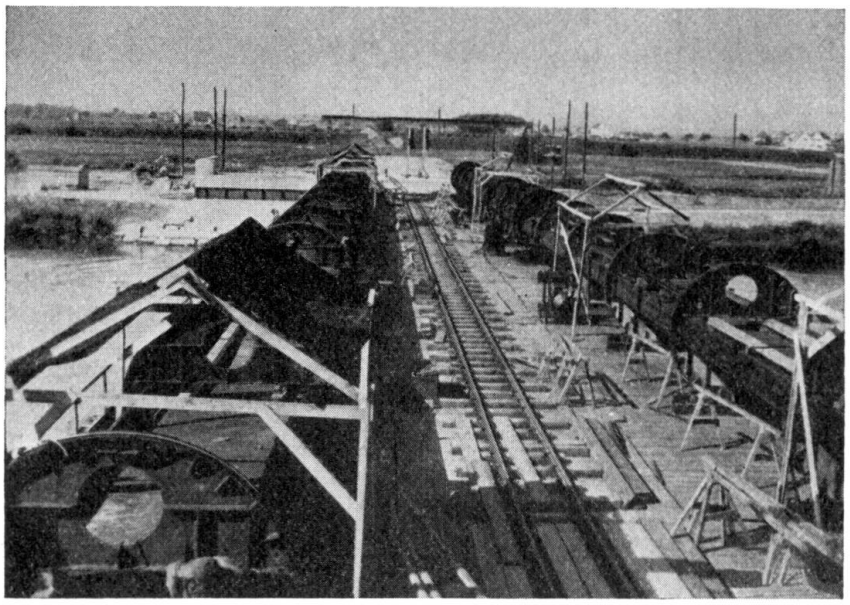

Fig. 5.

la fixation interne. De même que dans les âmes il faut éviter ici les contraintes thermiques additionnelles dues à la fixation externe. Il est avantageux de placer

les joints des semelles aux endroits où les sollicitations sont minima, dans les poutres continues par exemple, aux endroits où les moments maxima sont les plus faibles, c'est-à-dire où le matériau est le moins sollicité. Il est bon de ne pas disposer dans la même section les joints de semelles et les joints d'âme. Cette manière de procéder permet de construire à l'atelier des poutres à âme pleine de très grande longueur. La fig. 1 représente une poutre à âme pleine de 63 m de longueur, de 4 m environ de hauteur et d'un poids d'environ 105 t, exécutée de la sorte et transportée d'une seule pièce de Dortmund-Derne au chantier (Rügendamm). Lorsque les dimensions sont plus grandes encore on peut entièrement souder sur le chantier les âmes et les

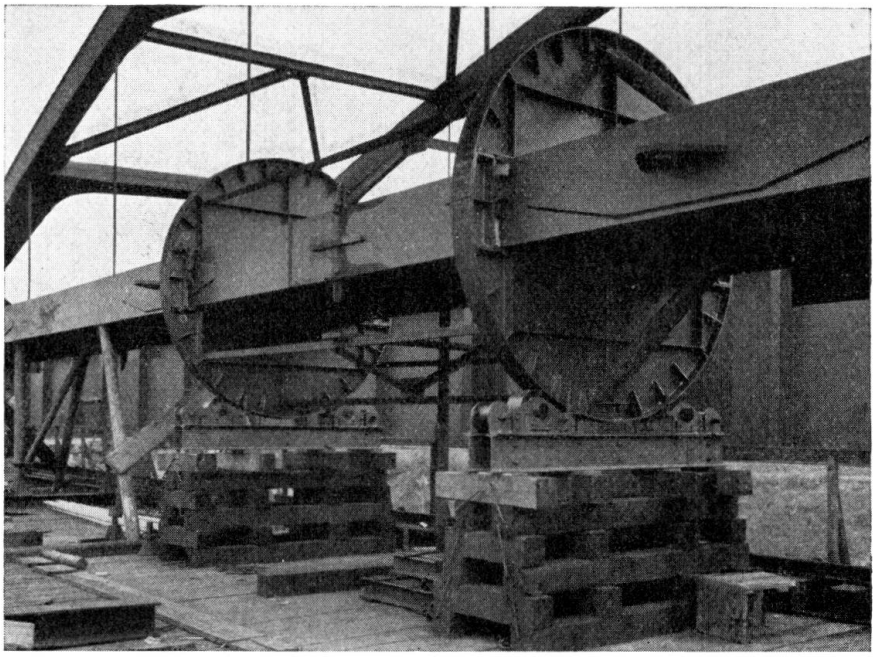

Fig. 6.

semelles. Il suffit dans ce cas de prévoir les mêmes installations et les mêmes conditions qu'à l'atelier. Il est évident que dans ce cas tous les cordons doivent être exécutés, même sur le chantier, en position normale, en plaçant les poutres dans des dispositifs rotatifs, et en outre à l'abri des intempéries. Comme exemple, citons la construction en acier St. 52 de 4 poutres à âme pleine soudées de 130 m de longueur chacune (poutres sur 4 appuis, fig. 2, 3 et 4) pour le pont sur l'Elbe près de Dömitz. Ces poutres ont été construites exactement suivant la méthode ci-dessus. Nous n'avons rencontré aucune difficulté quoique ce fut la première fois que l'on procédait de la sorte. C'est suivant la même méthode que l'on a construit les poutres raidisseuses, d'une longueur de 95 m environ, d'un pont d'autoroute du type *Langer* franchissant le Lech près d'Augsburg (fig. 5 et 6).

On voit que les conditions sont jusqu'à présent extraordinairement favorables pour le soudage des poutres à âme pleine. Elles deviennent plus compliquées lorsqu'il est impossible d'éviter les joints universels, et lorsqu'il faut rassembler par soudage des éléments de poutre terminés. On ne peut plus éviter alors les contraintes thermiques additionnelles dues à la fixation externe. On peut

cependant les maintenir dans des limites admissibles en adoptant une suite adéquate du soudage; on peut en outre faire en sorte que, par exemple dans les zones soumises à une forte traction, le soudage engendre une compression agissant comme précontrainte et inversément. Citons comme exemple le joint

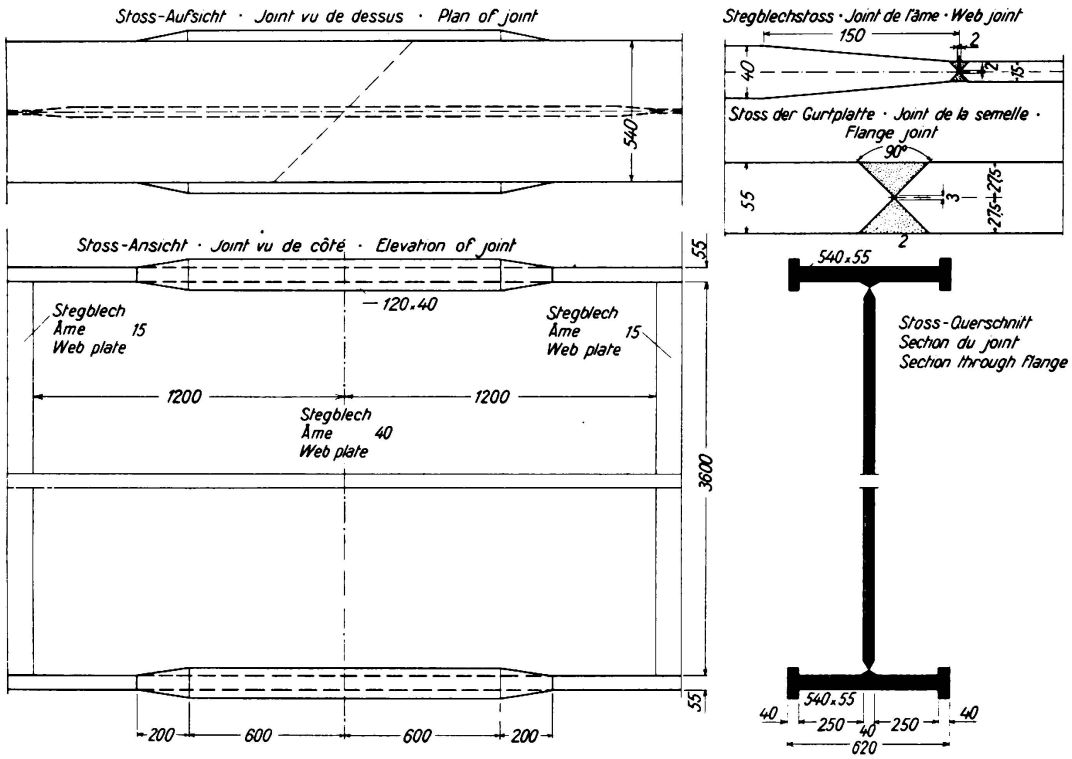

Fig. 7.

représenté à la fig. 7 des poutres à âme pleine du pont sur le Strelasund de la digue de Rügen. Il s'agit d'une poutre continue soudée reposant sur 6 appuis et dont les ouvertures ont chacune 54 m. Des mensurations exactes du Laboratoire d'essai des matériaux de Dahlem ont permis de fixer une suite du soudage telle que la membrure la plus fortement sollicitée à la traction par le poids propre et

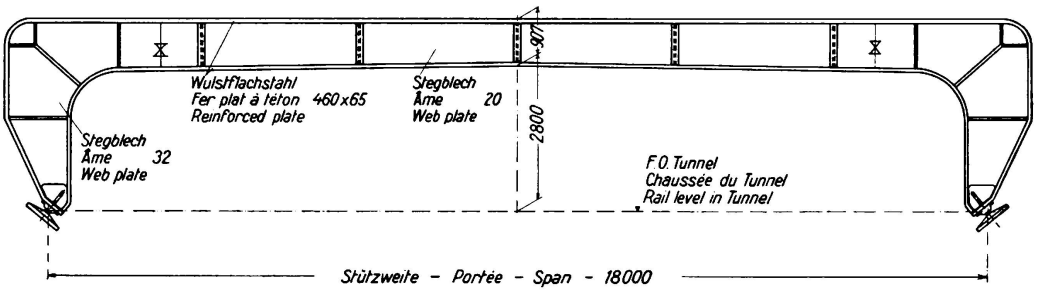

Fig. 8.

la surcharge était soumise à une précontrainte de compression d'environ 300 kg. L'âme renforcée était, en son milieu, soumise à une précontrainte de traction d'environ 350 kg.

Dans les arcs et les cadres à âme pleine, les contraintes thermiques sont à peine plus défavorables que dans les poutres à âme pleine, pour autant que l'on puisse

éviter les contraintes dues à la fixation externe. Pour le cadre de la fig. 8 (Duisburg) on a d'abord soudé les trois pièces de l'âme puis seulement les deux membrures qui sont d'une seule pièce sans joint et pliées. Du fait que l'on a soudé à partir du milieu, vers les deux articulations et que l'on a appliqué les semelles à l'âme grâce à un dispositif spécial, on a pu éliminer les contraintes thermique additionnelles dues aux fixations externes.

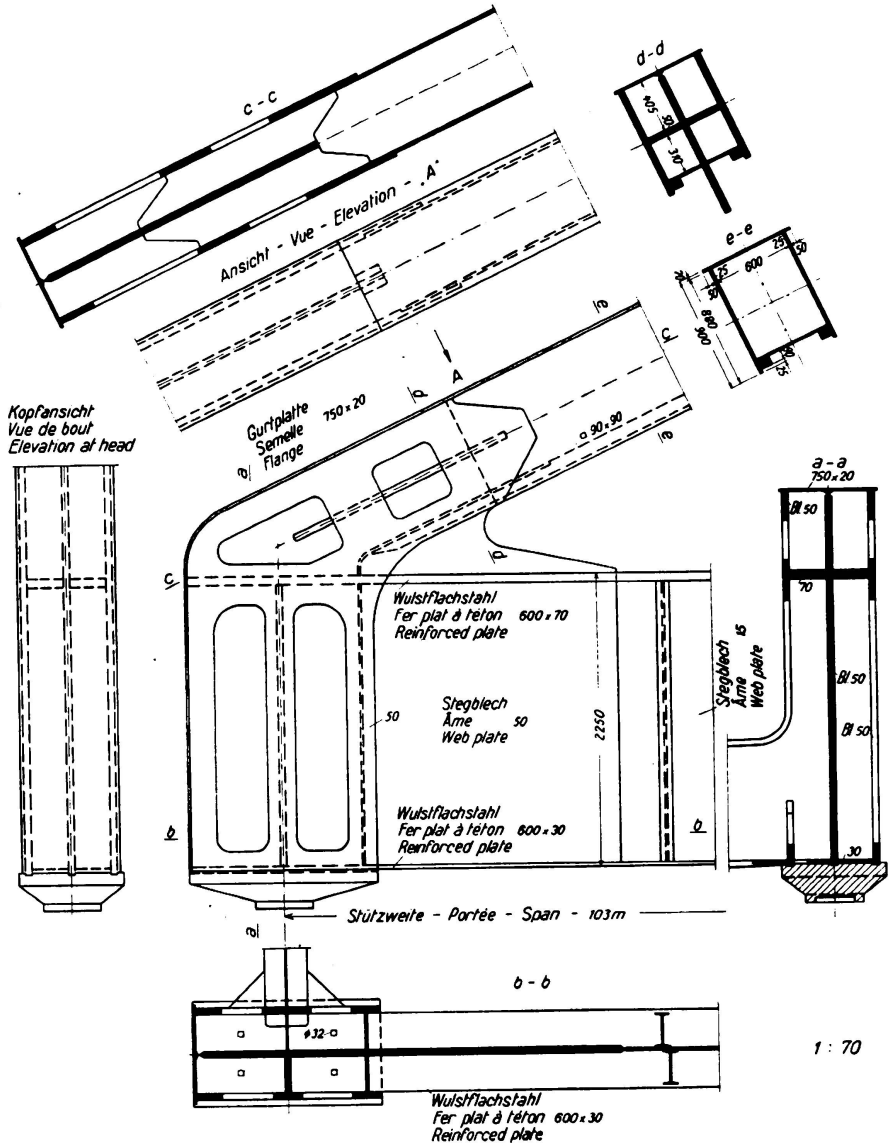

Fig. 9.

Jusqu'ici nous n'avons parlé que de constructions que l'on peut considérer comme planes. La lutte contre les contraintes de retrait dues à la fixation externe est beaucoup plus compliquée dans les constructions spatiales. Dans certains cas il faut appliquer des mesures spéciales. La fig. 9 représente par exemple l'extrémité d'une poutre du type *Langer* de 104 m de portée, complètement soudée et composée uniquement de profilés laminés. Même si le soudage de cette pièce n'a présenté aucune difficulté insurmontable, son exécution n'était cependant pas des plus simples. Cette pièce exigeait de nombreux travaux de soudage.

Elle a été exécutée à 8 exemplaires en tout pour les deux ponts juxtaposés. De nombreuses investigations, y compris aux rayons X, ont prouvé la perfection de son exécution. L'expérience acquise dans cette construction nous a conduit à exécuter suivant la fig. 10 la pièce d'extrémité d'une poutre du type *Langer* de 95 m de portée. Afin de simplifier les travaux de soudage et de réduire les contraintes de retrait on a introduit une pièce forgée entre l'arc à paroi double et la poutre raidisseuse à paroi simple. Cette pièce pénètre fortement dans la poutre raidisseuse et a été soudée d'une manière simple et parfaite, sans con-

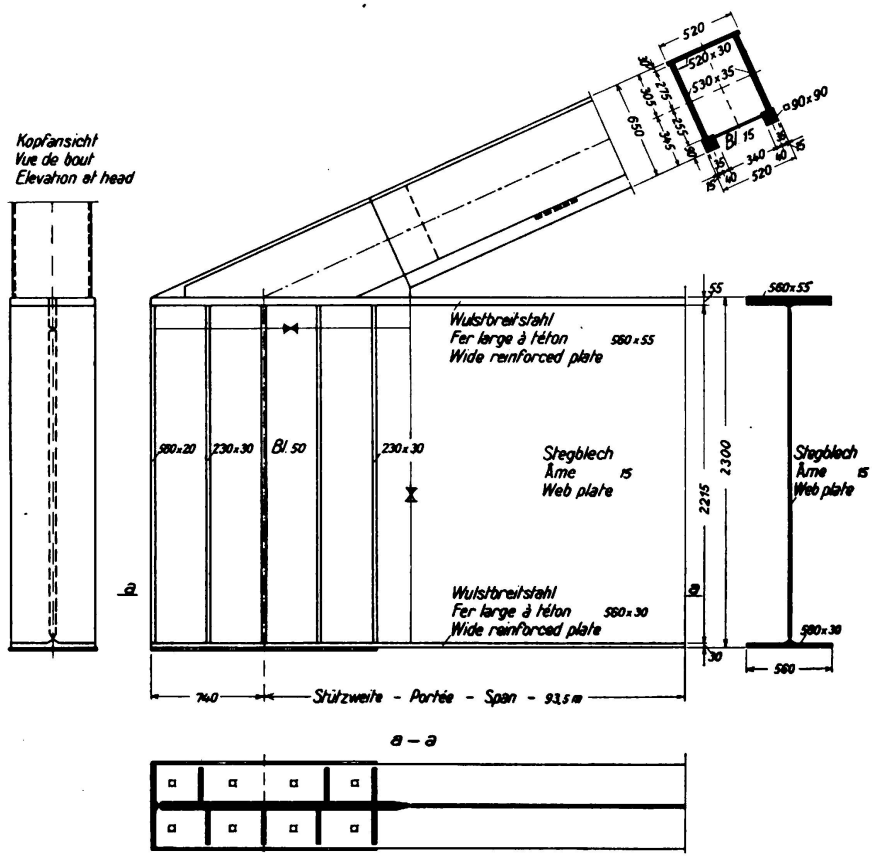

Fig. 10.

traintes de retrait dues à la fixation externe, avec l'âme et la semelle fendue. C'est sur cette pièce forgée que repose l'arc à paroi double. Je crois que cette solution se justifie d'elle-même et je ne m'y arrêterai pas plus longtemps.

Pour éviter les contraintes de retrait, il ne faut pas craindre, dans certains cas particuliers, d'avoir recours au rivetage dans un ouvrage soudé. Cela permet souvent de réaliser une économie. Il ne faut pas vouloir tout souder dans toutes les circonstances. Cette manière de voir a été approuvée au dernier congrès international de Paris en 1932. Il est par exemple toujours avantageux de river les assemblages des longerons et des entretoises ainsi que les assemblages du contreventement dans les ponts métalliques soudés. Pour ériger de grands ponts, on doit recourir en ces points à des assemblages boulonnés, et ceci afin de simplifier le travail de mise en place des différentes parties de la superstructure. On peut donc disposer ces assemblages boulonnés de telle sorte qu'ils suffisent comme assemblages rivés tout en économisant des soudures. L'expérience m'a

montré que la façon la plus économique de construire des ponts réticulés soudés est d'assembler par soudures les différents membres du treillis et du tablier à l'aide de profilés laminés et de river les noeuds et les attaches. Dans les sections tendues on peut compenser l'affaiblissement produit par les trous de rivets en soudant des renforcements locaux. J'ai construit, d'après cette méthode et avec d'excellents résultats au point de vue économique, plusieurs superstructures dont la fig. 11 donne un exemple.

Le second problème est résolu lorsque, comme dans toutes les constructions normales avec cordons d'épaisseur normale, les contraintes thermiques ne sont pas plus grandes que les contraintes de laminage dans les profilés laminés. Nous

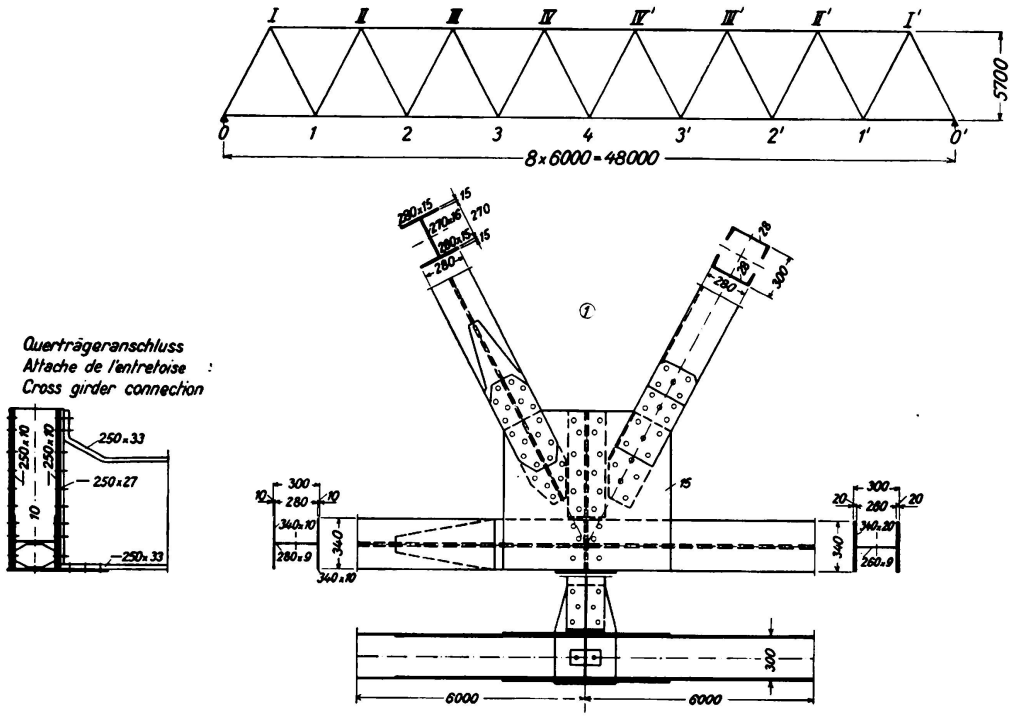

Fig. 11. Poutre-maîtresse. Noeud No. 1.

savons en effet, par l'expérience acquise au cours de plusieurs décades, que ces dernières ne sont pas dangereuses. Cependant on a mesuré dans des constructions d'un type spécial, avec soudures très épaisses, des contraintes de soudage qui dépassent parfois 2000 kg/cm². On ne peut pas considérer sans autre de telles contraintes comme non dangereuses. Le *Dr. Schroeder* a publié en 1931 un rapport à ce sujet où il explique l'origine de ces fortes contraintes de soudage. Des essais effectués sur de petites pièces ont montré que ces contraintes de soudage ne s'ajoutent pas aux contraintes engendrées par la surcharge et par conséquent ne mettent pas en danger la résistance de la pièce. Ce phénomène n'a trouvé aucune explication fondée mais c'est un fait dûment constaté. Des doutes subsistaient cependant toujours et le *Dr. Schaper* s'est décidé à entreprendre des essais sur des pièces de grandeur naturelle; les résultats acquis seront prochainement publiés.[6] Décrivons un de ces essais: On a découpé les deux angles d'un

[6] Publiés depuis lors: *Schaper:* „Die Schweißung im Ingenieurhochbau und Brückenbau". Elektroschweißung 1937, fasc. 7.

cadre complètement soudé du tunnel pour piétons de Duisburg (fig. 8) et on les a placé dans la presse de 600 t de Dahlem. On a mesuré dans ces pièces les contraintes de soudage indiquées à la fig. 12. L'angle a supporté des contraintes d'essai de 2500 kg/cm² sans subir aucun dommage apparent. La machine ne permettait pas d'appliquer une plus forte surcharge, c'est pourquoi ces angles seront placés dans une machine plus forte. Cet essai prouve que même des contraintes de soudage de plus de 2000 kg/cm² ne mettent pas en danger la résistance des constructions soudées. Les autres essais de *Schaper* ont fourni le même résultat.

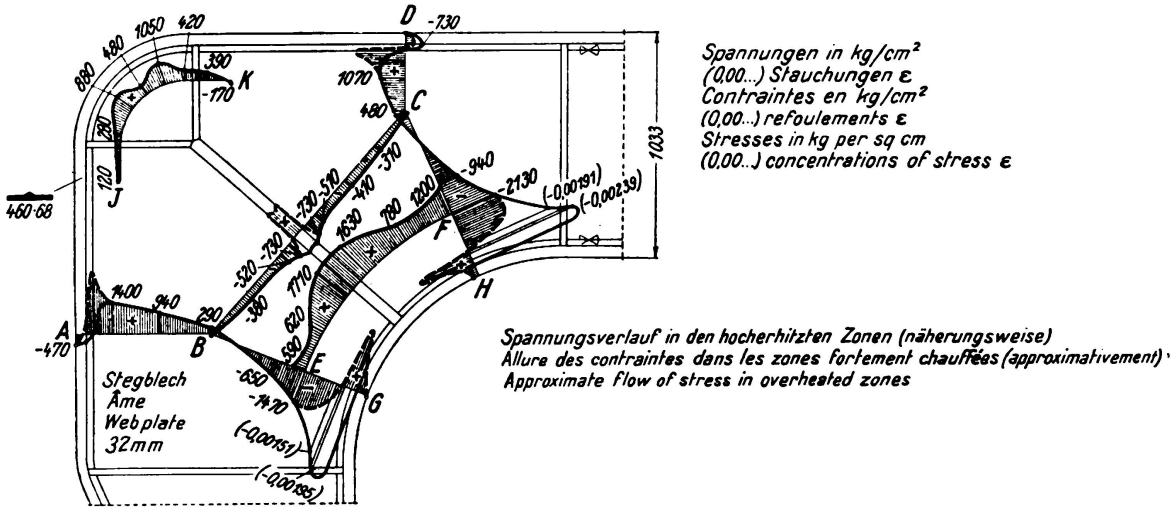

Fig. 12.

Mensuration des contraintes de soudage lors de la construction.

En terminant je voudrais citer un article de *Körber* et *Mehovar*[7] dans lequel les auteurs démontrent que le remisage des rails nouvellement laminés en modifie les propriétés mécaniques: L'allongement et la striction qui précèdent la rupture — caractéristiques pour les hautes capacités de travail — croissent d'une manière importante avec un remisage prolongé. Le recuit peut accélérer et augmenter cet effet. On suppose que la raison en est l'égalisation des contraintes structurales. On ne peut pas transposer sans autre à nos aciers de construction les relations trouvées pour les aciers de rails. D'autres part ces relations ne peuvent pas s'écarter fortement les unes des autres. On peut donc conclure que le remisage provoquera également une égalisation des contraintes structurales dans les cordons de soudure. Si les auteurs, que nous venons de citer ont pu constater un accroissement de l'allongement et de la striction par suite d'un recuit modifiant la cristallisation, on peut penser qu'il faut appliquer un traitement correspondant aux soudures importantes et à leurs environs. Je suis d'avis qu'à ce point de vue il est encore possible d'améliorer les cordons de soudure.

---

[7] *Friedrich Körber* et *Johannes Mehovar:* „Beitrag zur Kenntnis der zeitlichen Änderungen der mechanischen Eigenschaften walzneuer Schienen, insbesondere aus Thomasstahl". Mitteilungen aus dem Kaiser-Wilhelm-Institut für Eisenforschung zu Düsseldorf, vol. XVII, livraison 7, mémoire 277.