

Considérations générales sur le soudage

Autor(en): **Schaechterle, K.**

Objekttyp: **Article**

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

Band (Jahr): **2 (1936)**

PDF erstellt am: **21.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-3037>

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.

III a 1

Considérations générales sur le soudage.

Allgemeine Betrachtungen über das Schweißen.

General Considerations on Welding.

Oberbaurat Dr. Ing. K. Schaechterle,
Direktor bei der Reichsbahn, Berlin.

Les résultats des essais d'endurance effectués par le Prof. *O. Graj* de 1928 à 1933 au Laboratoire d'essai des matériaux de l'École polytechnique de Stuttgart sont résumés dans mon rapport intitulé: « La durabilité des assemblages rivés et soudés, et le dimensionnement des éléments sollicités dynamiquement, basé sur les résultats d'essais à la durabilité » (2^e vol. de « Mémoires » de l'A. I. P. C., Zurich 1934). Depuis lors, nos connaissances sur l'influence des charges dynamiques, souvent répétées, ont été étendues et approfondies par de très nombreuses études.

Nous avons fait différentes constatations qui concordent avec les résultats d'études parallèles faites dans d'autres instituts de recherches. L'endurance des aciers de construction de composition et d'origine différentes est influencée par les irrégularités du matériau, les particularités de surface et le degré d'usinage. Les amincissements et les épaisissements, les trous et les cordons de soudure ont une influence défavorable sur l'endurance. Sous une surcharge (statique) croissant progressivement, la rupture est précédée d'une forte déformation plastique liée à une solidification par étirage à froid tandis que sous une surcharge ondulée et alternée souvent répétée, la déformation plastique et la solidification sont plus faibles et les valeurs de l'endurance se trouvent plus ou moins bas au-dessous des valeurs de rupture ordinaire. Pour une surcharge statique, les ondes et les pointes de tension se font beaucoup moins sentir, par suite d'égalisation des tensions dans le domaine plastique, tandis que pour une surcharge dynamique, les pointes de tensions entraînent une réduction de l'endurance. Cette réduction est beaucoup plus grande dans les aciers durs que dans les aciers doux. Finalement, les aciers pour lesquels le relèvement de la résistance et de la limite d'étirement est lié à un fort accroissement de la sensibilité aux entailles, ne conviennent pas du tout aux besoins de la construction des ponts.

Les résistances à la traction $\sigma_B = 40$ et 57 kg/mm^2 et les résistances aux efforts répétés (variant entre 0 et une limite déterminée) $\sigma_U = 27$ et 31 kg/mm^2 , déterminées sur des éprouvettes en acier St. 37 et St. 52, ont donné: un rapport $\frac{\text{résistance aux efforts répétés}}{\text{résistance à la traction}} = 0,68$ pour l'acier St. 37 et $0,55$ pour l'acier

St. 52. Pour une barre avec trous, ces rapports sont 0,50 pour l'acier St. 37 et 0,36 pour l'acier St. 52. La réduction est plus forte pour l'acier St. 52 que pour l'acier St. 37, ce qu'il faut attribuer à la plus forte sensibilité aux entailles de l'acier St. 52.

L'acier doux ordinaire St. 37 convient aussi bien au rivetage qu'au soudage. Les aciers à haute résistance St. 52 de composition et d'origine différentes présentent de grandes différences quant à leur soudabilité. Des aciers avec alliages et à haute teneur en carbone, traités imparfaitement du point de vue mécanique et thermique ont déjà conduit à des échecs. Le soudage et les inévitables contraintes de retrait ont amené des fissures dangereuses dans un acier St. 52 avec 0,25 % C; 1,20 % Mn; 0,76 % Si; 0,5 % Cu; 0,023 % S et P, avec hautes limites de rupture ($\sigma_B = 58 \text{ kg/mm}^2$) et d'écoulement ($\sigma_F = 44 \text{ kg/mm}^2$) pour un allongement de 20 %; cet acier présentait cependant de fines entailles à partir des bords. Jusqu'à présent on n'a constaté aucun phénomène semblable dans les aciers St. 52 à surface lisse et sans entaille et avec moins de 0,18 % de C et 0,5 % de Si. Pour les constructions soudées en acier St. 52 il faut donc déterminer par des essais la composition la plus favorable du matériau. Il faut en outre fixer quelle électrode fournit le meilleur assemblage avec le métal de base choisi; le plus simple est de contrôler les électrodes par des éprouvettes avec soudures bout à bout soumises à un essai d'endurance (résistance aux efforts répétés). Il faut en outre déterminer la composition, la structure et la fissurabilité du métal de base et du métal d'apport.

I. C'est en 1931 qu'ont paru les premières prescriptions allemandes sur les ouvrages soudés (DIN 4000 pour les ponts et les charpentes); elles s'appuyaient sur les essais statiques du laboratoire d'essais de Dresde. On croyait alors que les soudures d'angle étaient préférables aux soudures en bout et, suivant l'exemple de la construction rivée, on se servait de couvre-joints. On traitait les ponts soudés comme les ouvrages rivés, c'est-à-dire que l'on prescrivait les mêmes formules pour le dimensionnement des sections: par ex. pour une charge alternée et un acier St. 37, $\sigma = \frac{M_{\max} - 0,3 M_{\min}}{W_n} \leq \sigma_{\text{adm}} \leq 14 \text{ kg/mm}^2$. Pour les cordons soumis à des charges ondulées on avait introduit la formule américaine $M = M_{\max} + \frac{1}{2} (M_{\max} - M_{\min})$. Les premiers essais d'endurance sur des éléments de construction soudés ont fourni des résultats étonnants par rapport aux essais statiques. Ils ont montré que la résistance d'un assemblage soudé dépendait non seulement de la résistance de la soudure et de la zone de transition, dans laquelle les propriétés du métal de base ont été modifiées par la chaleur au cours du soudage, mais dans une beaucoup plus forte proportion de l'écoulement des forces; l'état intérieur de tension joue le rôle le plus important sur l'apparition de la rupture par fatigue. Le joint bout à bout avec écoulement naturel des forces a fourni une bien meilleure résistance à la traction ondulée que l'assemblage par couvre-joint avec soudures d'angle où les forces sont déviées et où se produisent des pointes de tension. On a recouvert un assemblage en bout par des couvre-joints supplémentaires avec soudures d'angle et l'on a remarqué que la résistance aux efforts ondulés et alternés diminuait assez fortement. La rupture partait des soudures d'angle frontales qui, contrairement à ce que l'on pensait jusqu'alors, fournissent

de bien meilleurs résultats lorsqu'elles sont concaves, avec raccord doux de la soudure à la tôle, que lorsqu'elles sont exécutées sous forme de soudures d'angle pleines. En tenant compte des résultats des essais on a introduit, dans le règlement officiel DIN 4100 de 1933 une utilisation des soudures bout à bout aux $\frac{4}{5}$ de la contrainte admissible pour le métal de base. Cette prescription conduit à l'adoption de soudures obliques. D'autres essais ont montré cependant que l'allongement du cordon de soudure n'a pas augmenté l'endurance de l'assemblage par rapport à une soudure bout à bout perpendiculaire. D'autre part il est possible de relever l'endurance des assemblages à couvre-joints par des mesures spéciales telles que l'affûtage des extrémités des couvre-joints, permettant d'obtenir une transition douce, et l'usinage soigné à la fraise des soudures d'angle et tout spécialement des extrémités des soudures d'angle latérales. Il fut ainsi nécessaire de modifier encore une fois les règlements en faisant une distinction nette entre les ouvrages sollicités statiquement et les ouvrages sollicités surtout dynamiquement.

Si l'on porte sous forme de diagrammes les résistances à la fatigue d'un acier ordinaire et d'un acier à haute résistance on obtient la courbe de σ_0 représentée à la fig. 1 par rapport à la contrainte inférieure σ_u . L'amplitude $\sigma_s = \sigma_0 - \sigma_u$ est donnée par la distance comprise entre la courbe de σ_0 et la droite inclinée à 45° de σ_u . La surface hachurée est le domaine des oscillations. A cause des grandes déformations qu'entraîne le dépassement de la limite d'écoulement, les parties du diagramme situées au delà de cette limite n'entrent pas en ligne de compte pour les applications pratiques. Dans la partie restante du diagramme on peut approximativement remplacer la courbe d'endurance par une droite. L'amplitude décroît vers la limite d'écoulement. Pour les constructions soudées, les essais du Prof. Graf permettent d'admettre avec une exactitude suffisante une amplitude σ_s partout égale, c'est-à-dire $\sigma_s = \sigma_U = 2 \sigma_W$.

Pour dimensionner les pièces de ponts sollicitées dynamiquement, il faut considérer les valeurs maxima des efforts normaux, des efforts tranchants et des moments de flexion provenant de la charge fixe et de la charge mobile multipliée par le coefficient φ . Les contraintes que donnent ces valeurs maxima doivent se trouver à l'intérieur du diagramme de sécurité (σ_{Dadm}).

Sur la base des résultats fournis par les essais exécutés par la Commission spéciale (Dauerfestigkeitsversuche mit Schweißverbindungen, Berlin 1935, Edition VDI), le comité chargé d'établir les règlements concernant les ponts-rails soudés a déterminé les diagrammes représentés aux fig. 2a et 2b.

Dans ces diagrammes apparaît clairement l'exigence actuelle du relèvement, aussi poussé que possible, des contraintes admissibles. σ_{Dadm} se rapproche fortement des valeurs de résistance aux efforts alternés obtenues lors des essais (valeurs moyennes pour $2 \cdot 10^6$ oscillations), l'écart n'est en partie que de 1 kg/mm^2 . On n'a pas tenu compte des inévitables contraintes de retrait. Tout en conservant la méthode de calcul indiquée dans le règlement allemand BE (Berechnungsgrundlagen für stählerne Eisenbahnbrücken), on a introduit à côté du coefficient d'oscillations γ pour les parties d'ouvrages sans joints, des coefficients de forme variables α , qui permettent de traiter les éléments sollicités dynamiquement comme ceux soumis à des charges fixes. Dans le contrôle des con-

traintes avec $\sigma_I = \frac{\gamma}{\alpha} \cdot \frac{M_{I \max}}{W_n} \leq \sigma_{adm}$, les moments de flexion maxima, provenant

de la charge permanente et de la surcharge ($M_I = M_g + \varphi \cdot M_P$), seront multipliées par le coefficient d'oscillation γ et les différents types de construction ainsi que l'usinage des soudures seront pris en considération grâce au coefficient de forme α . On calcule donc avec des contraintes virtuelles σ_I alors que les contraintes réelles s'obtiennent inversement à partir de $\sigma_{max} = \frac{\alpha}{\gamma} \cdot \sigma_I \left(= \frac{M_{I \max}}{W_n} \right)$. Les

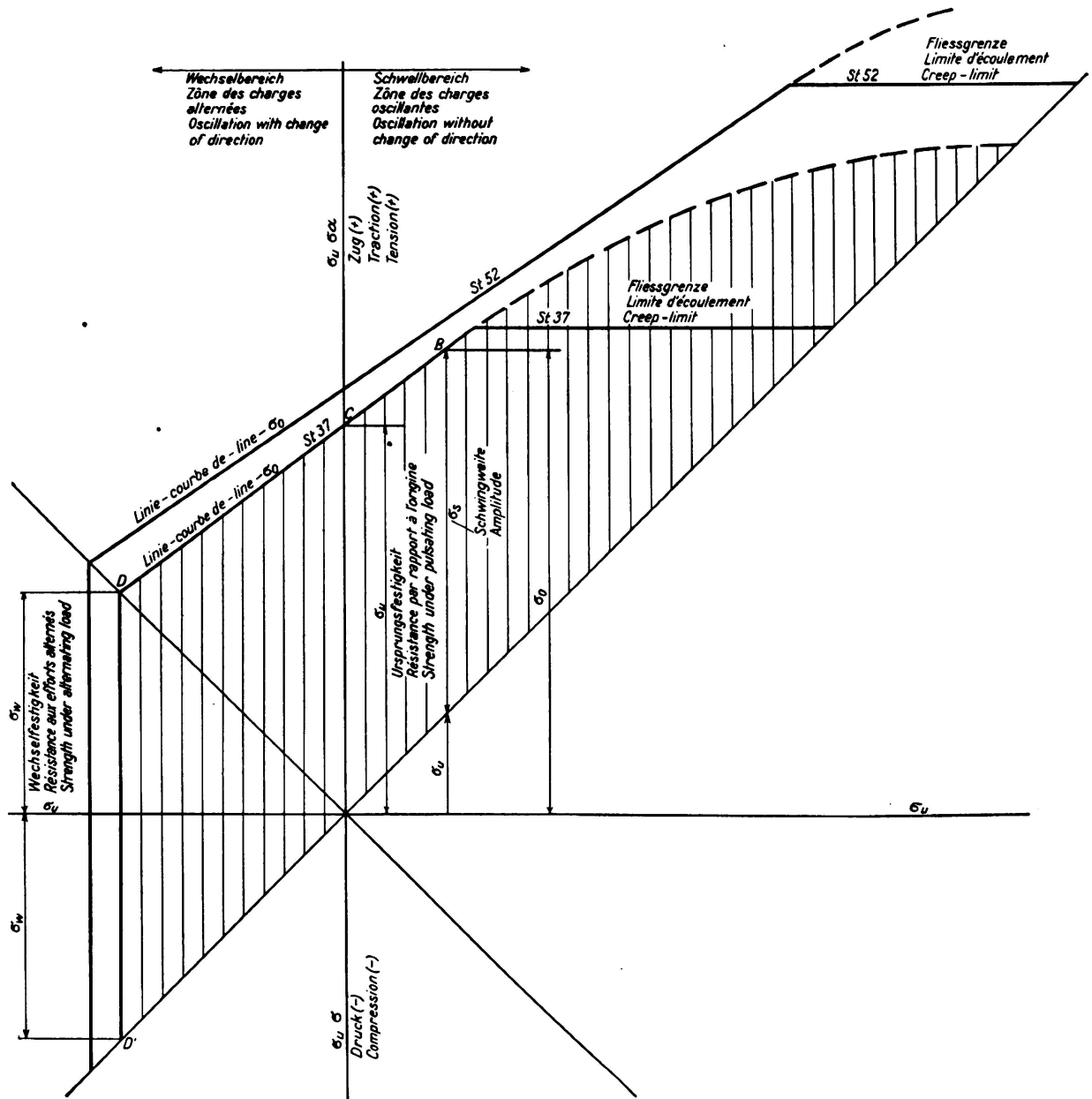


Fig. 1.

Courbe d'endurance à la traction (courbe de σ_0) pour les aciers St. 37 et St. 52.

valeurs γ et α pour ponts-rails se trouvent dans les tableaux 1, 2 et 3 du Règlement provisoire pour les ponts-rails à âme pleine soudés (Vorläufige Vorschriften für geschweißte vollwandige Eisenbahnbrücken). Les valeurs γ , qui dépendent du rapport $\frac{S_{I \min}}{S_{I \max}}$, respectivement $\frac{M_{I \min}}{M_{I \max}}$ sont à tirer du diagramme des tensions

pour $\alpha = 1$. Pour les valeurs α , rapportées à $\frac{S_{I \min}}{S_{I \max}}$, resp. $\frac{M_{I \min}}{M_{I \max}}$, on obtient des courbes à faible courbure qui, dans les règlements, peuvent être approximative-

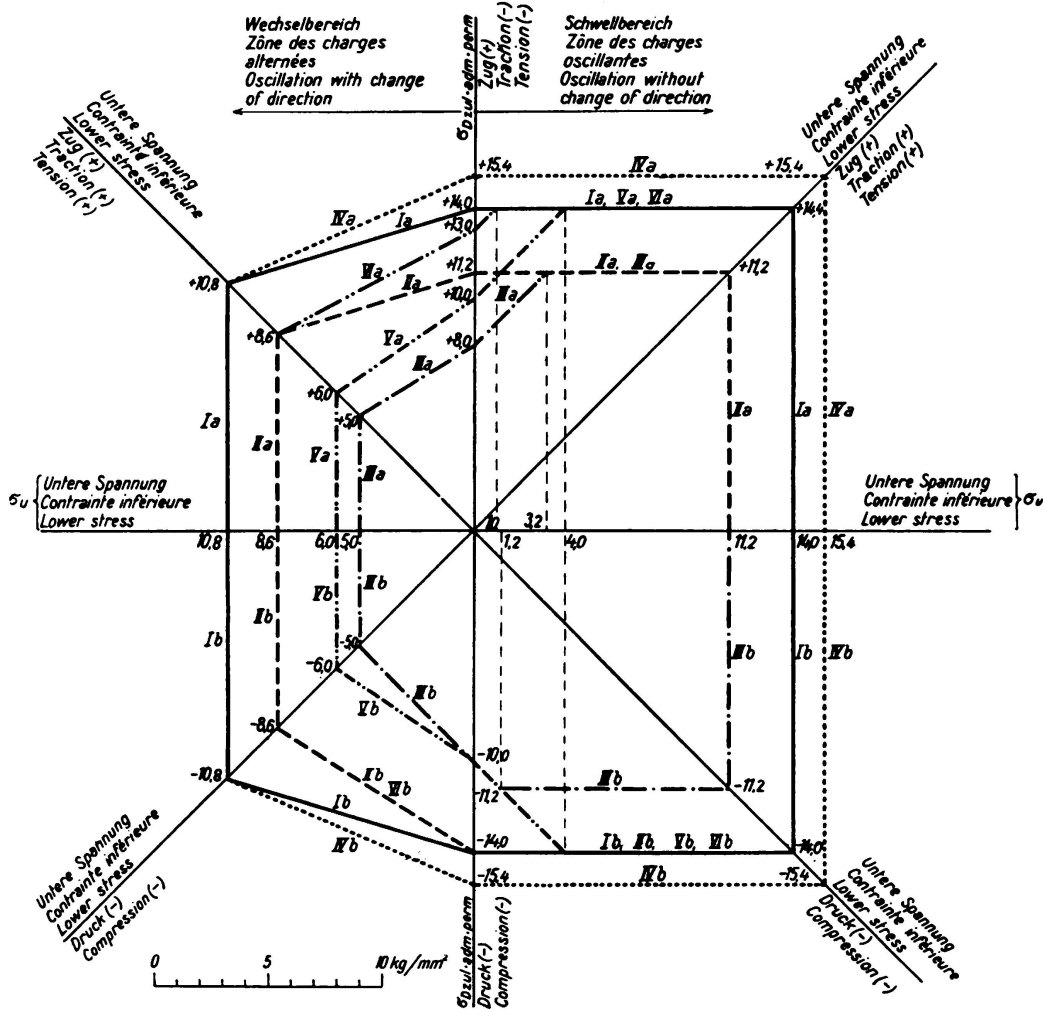


Fig. 2 a.

Diagramme des contraintes admissibles $\sigma_{D \text{ adm}}$ dans le cas des ponts soudés en acier St. 37.

- I a, I b Parties d'ouvrages ne comportant pas de joints, dans les domaines de la traction et de la compression;
- II a Parties d'ouvrages comportant des joints, dans le domaine de la traction, au voisinage des cordons de soudure bout à bout et dans ces cordons eux-mêmes, avec reprise des racines des cordons et usinage;
- II b Comme en II a, mais dans le domaine de la compression;
- III a, III b Comme en II a, II b, mais lorsqu'il n'est pas possible de reprendre les cordons par la racine;
- IV a, IV b Contraintes principales admissibles suivant la formule:

$$\sigma = \frac{\sigma_1}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{\sigma_1^2 + 4 \tau_1^2}$$

- V a, V b Parties d'ouvrages au voisinage de cordons frontaux et au commencement de cordons latéraux, le raccordement des cordons frontaux et les extrémités des cordons latéraux n'ayant pas été usinés.
- VI a, VI b Comme en V a, V b mais avec usinage soigné du raccordement des cordons frontaux et des extrémités des cordons latéraux.

ment remplacées par des droites. Le dimensionnement des ponts-rails soudés n'est pas rendu plus simple et plus expressif par la méthode de calcul choisie. La réduction des contraintes admissibles, rendue très claire par les diagrammes

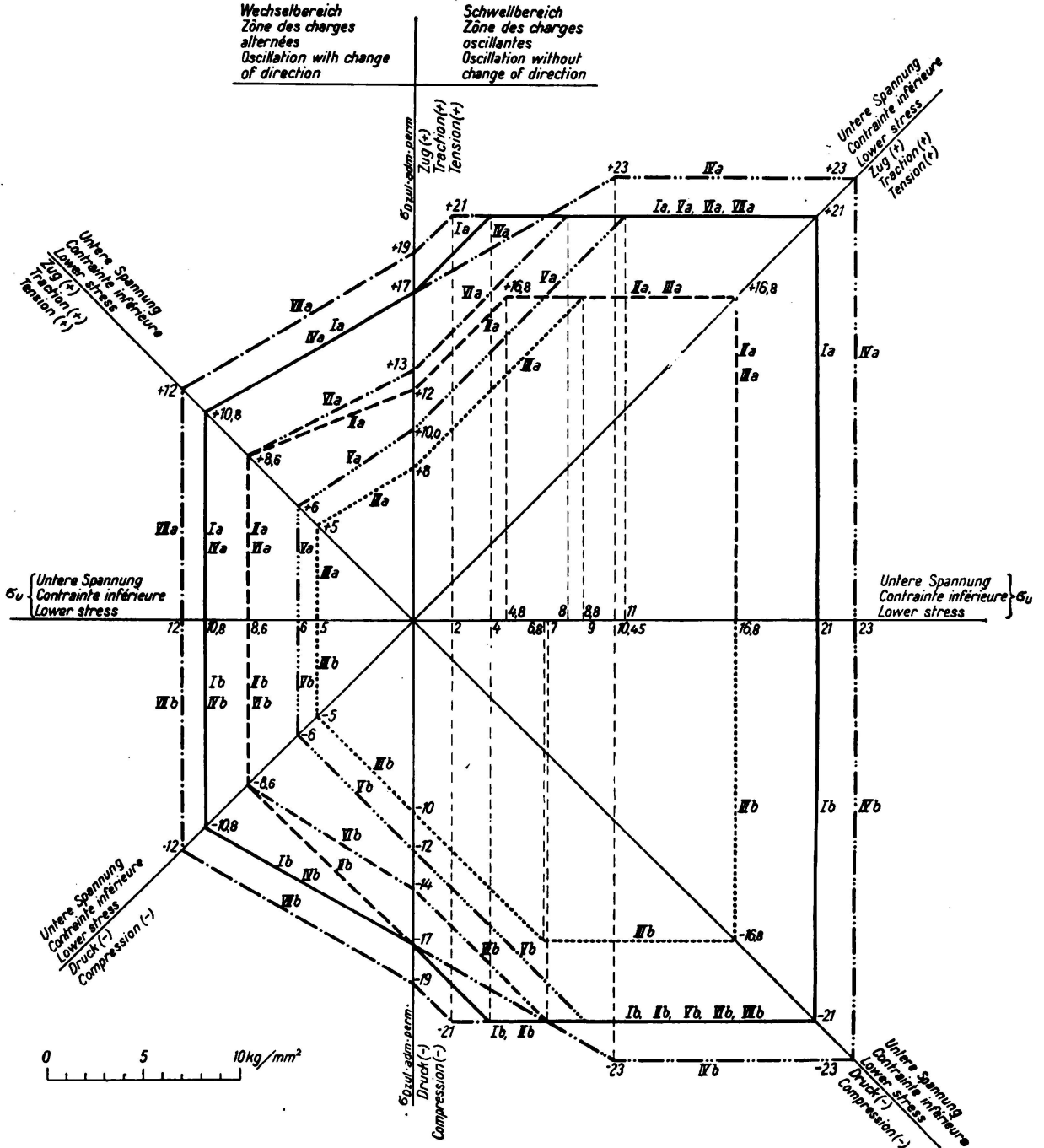


Fig. 2 b.

Diagramme des contraintes admissibles σ_{Dadm} dans le cas des ponts soudés en acier St. 52.

- Ia, Ib Parties d'ouvrages ne comportant pas de joints, dans les domaines de la traction et de la compression, pour un trafic intense (plus de 25 trains par jour sur chaque voie);
- IIa Parties d'ouvrages comportant des joints, dans le domaine de la traction, au voisinage des cordons de soudure bout à bout et dans ces cordons eux-mêmes, avec reprise des racines des cordons et usinage;
- IIb Comme en IIa, mais dans le domaine de la compression;

IIIa, IIIb Comme en IIa, IIb, mais lorsqu'il n'est pas possible de reprendre les cordons par la racine;

IVa, IVb Contraintes principales admissibles suivant la formule:

$$\sigma = \frac{\sigma_I}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{\sigma_I^2 + 4 \tau_I^2}.$$

Va, Vb Parties d'ouvrages au voisinage de cordons frontaux et au commencement de cordons latéraux, le raccordement des cordons frontaux et les extrémités des cordons latéraux n'ayant pas été usinés.

VIa, VIb Comme en Va, Vb mais avec usinage soigné des raccordements des cordons frontaux et des extrémités des cordons latéraux;

VIIa, VIIb Comme en Ia, Ib mais pour un trafic faible (jusqu'à 25 trains par jour sur chaque voie).

de tension, devient compliquée par suite de l'introduction des coefficients. La voie naturelle est cependant de démontrer que les contraintes maxima (σ_{\max}), que fournit le calcul statique, se trouvent dans tous les cas dans le domaine admissible, caractérisé par les diagrammes de contraintes. La réduction des contraintes admissibles poussera l'ingénieur à construire économiquement et d'une manière adaptée au soudage: il choisira par exemple les joints bout à bout au lieu de ceux avec couvre-joints, il placera les joints des poutres aux environs des points où les moments sont nuls, il éloignera des membrures les soudures de gorge dans les poutres à âme pleine, etc.

Si l'on admet une amplitude partout égale, on obtient pour cette amplitude, décroissant régulièrement vers la limite d'écoulement, la formule simple de dimensionnement, trouvée par *Wöhler*:

$$F_{\text{néc.}} = \frac{S_{\max} - S_{\min}}{\sigma_{\text{U adm}}}$$

tirée de la formule générale:

$$\sigma_{\text{D adm}} = \frac{\sigma_{\text{U adm}}}{1 - \frac{\sigma_{\text{U adm}} - \sigma_{\text{W adm}}}{\sigma_{\text{W adm}}} \cdot \frac{S_{\min}}{S_{\max}}} = \frac{S_{\max}}{F_{\text{néc.}}}$$

avec $\sigma_s = \sigma_U = 2 \sigma_W$.

Le calcul est ainsi fortement simplifié. Les tableaux ne sont plus nécessaires. On n'a plus qu'à déterminer les contraintes de base, les amplitudes admissibles, $\sigma_{s \text{ adm}}$, les coefficients de réduction pour joints bout à bout (= 0,8) et pour assemblages à couvre-joints avec soudures d'angle frontales et latérales (0,65 à 0,75). Il est ainsi possible de procéder au dimensionnement sans aucun tableau.

D'après nos connaissances actuelles, ces simplifications permettent de dimensionner dans les domaines de traction et de compression les éléments de construction continus et sans joint, en acier St. 37 et St. 52, à l'aide des lignes Ia et Ib, avec une amplitude $\sigma_{s \text{ adm}} = \sigma_{\text{U adm}} = 2 \sigma_{\text{W adm}} = 14$ et 16 kg/mm^2 . Pour les pièces jointes bout à bout (reprise des racines des cordons et usinage) il faut considérer dans le domaine de la traction la ligne IIa avec une amplitude de $0,8 \times 14 = 11,2 \text{ kg/mm}^2$ pour l'acier St. 37 et $0,8 \times 16 = 12,8 \text{ kg/mm}^2$ pour l'acier St. 52. Les joints bout à bout soumis à la compression peuvent être sollicités comme les pièces continues et sans joint (ligne IIb). Pour les éléments

de construction situés aux environs des soudures d'angle frontales et au commencement des cordons latéraux (raccordements soigneusement usinés), ce sont les lignes IIIa et IIIb qui sont valables: $0,75 \cdot 14 = 10,5 \text{ kg/mm}^2$ et $0,75 \cdot 16 = 12,0 \text{ kg/mm}^2$. Si les cordons ne sont pas usinés, il faut considérer les lignes IVa et IVb avec $0,65 \times 14 = 9,1 \text{ kg/mm}^2$ pour l'acier St. 37 et $0,65 \cdot 16 = 10,4 \text{ kg/mm}^2$ pour l'acier St. 52 (fig. 3a et 3b).

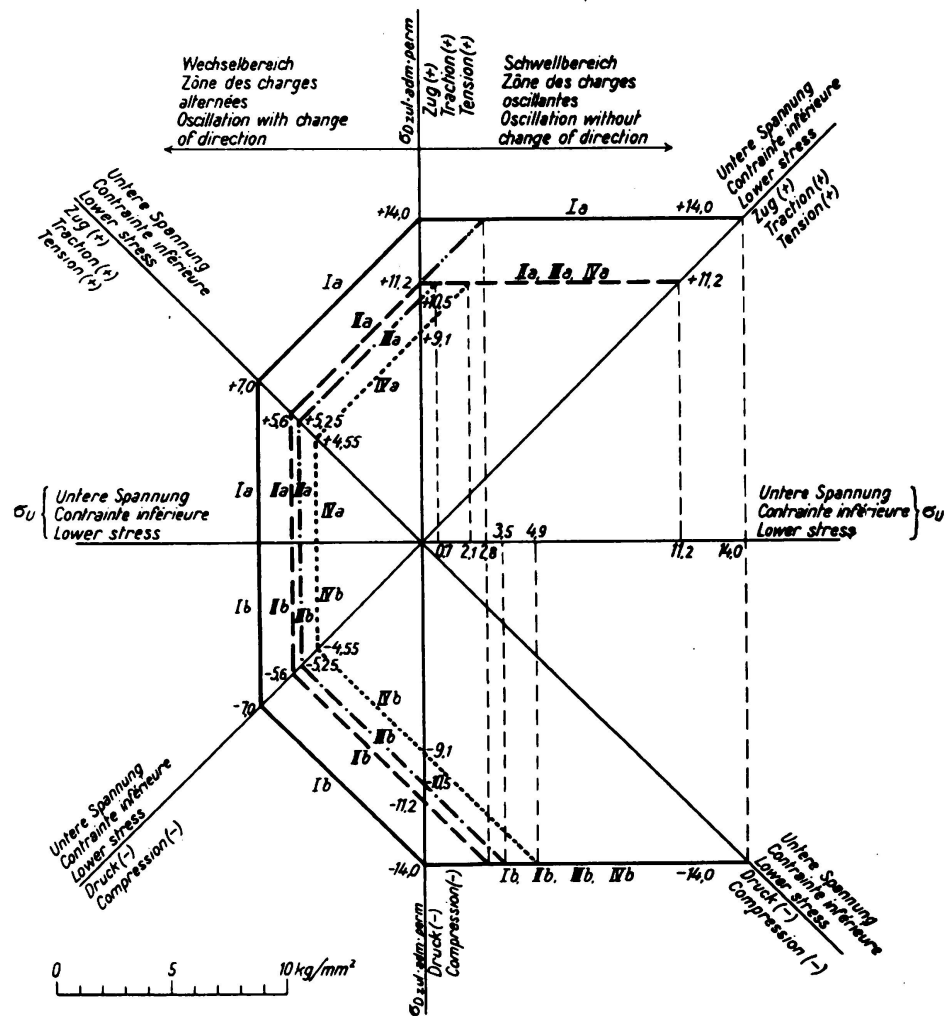


Fig. 3 a.

Diagramme des contraintes admissibles σ_{Dadm} dans le cas des ponts soudés en acier St. 37.

- Ia, Ib Parties d'ouvrages ne comportant pas de joints, dans les domaines de la traction et de la compression. $\sigma_u = 14 \text{ kg/mm}^2$.
- IIa, IIb Parties d'ouvrages comportant des joints, dans les domaines de la traction et de la compression, au voisinage des cordons de soudure bout à bout et dans ces cordons eux-mêmes, avec reprise des racines des cordons et usinage. $\sigma_u = 0,8 \cdot 14 = 11,2 \text{ kg/mm}^2$.
- IIIa, IIIb Parties d'ouvrages, dans les domaines de la traction et de la compression, au voisinage de cordons frontaux et au commencement de cordons latéraux, le raccordement des cordons frontaux et les extrémités des cordons latéraux étant soigneusement usinés. $\sigma_u = 0,75 \cdot 14 = 10,5 \text{ kg/mm}^2$.
- IVa, IVb Comme ci-dessus dans les domaines de la traction et de la compression. Raccordement des cordons frontaux et extrémités des cordons latéraux non usinés. $\sigma_u = 0,65 \cdot 14 = 9,1 \text{ kg/mm}^2$.

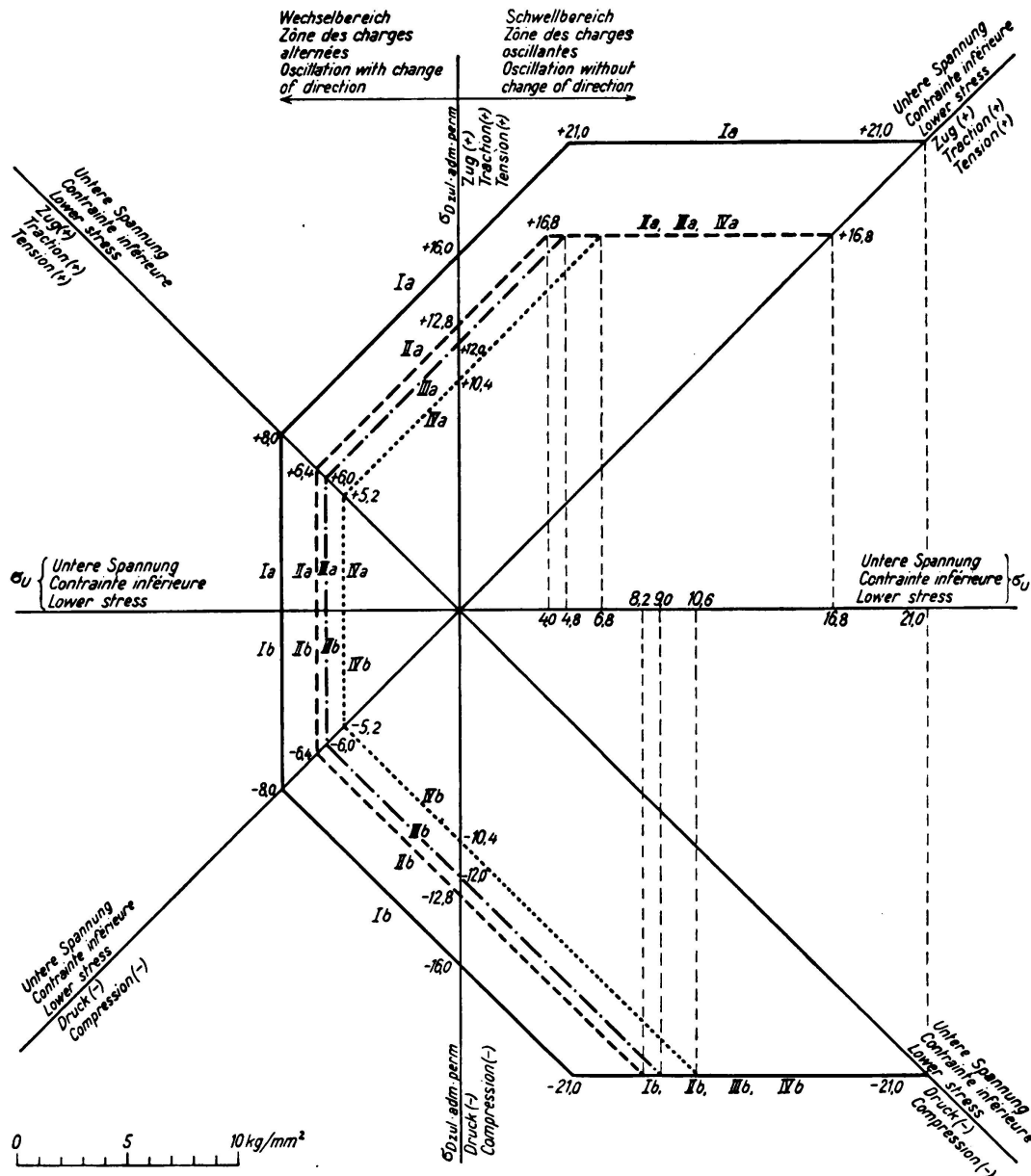


Fig. 3 b.

Diagramme des contraintes admissibles $\sigma_{D adm}$ dans le cas des ponts soudés en acier St. 52.

- I a, I b Parties d'ouvrages ne comportant pas de joints, dans les domaines de la traction et de la compression. $\sigma_u = 16 \text{ kg/mm}^2$.
- II a, II b Parties d'ouvrages comportant des joints, dans les domaines de la traction et de la compression, au voisinage des cordons de soudure bout à bout et dans ces cordons eux-mêmes, avec reprise des racines des cordons et usinage. $\sigma_u = 0,8 \cdot 16 = 12,8 \text{ kg/mm}^2$.
- III a, III b Parties d'ouvrages, dans les domaines de la traction et de la compression, au voisinage de cordons frontaux et au commencement de cordons latéraux, le raccordement des cordons frontaux et les extrémités des cordons latéraux étant soigneusement usinés. $\sigma_u = 0,75 \cdot 16 = 12 \text{ kg/mm}^2$.
- IV a, IV b Comme ci-dessus dans les domaines de la traction et de la compression. Raccordement des cordons frontaux et extrémités des cordons latéraux non usinés. $\sigma_u = 0,65 \cdot 16 = 10,4 \text{ kg/mm}^2$.

II. En ce qui concerne l'influence des essais sur le mode d'exécution, on peut dire que les essais d'endurance ont contribué, par le choix de formes appropriées, à la meilleure utilisation des propriétés du matériaux et par le fait même à une économie de poids, tout en relevant la sécurité et la qualité des ouvrages soudés. L'étude des assemblages soudés, basée sur les essais statiques, a souvent conduit à de fausses conclusions et à de mauvaises constructions, citons par exemple le projet d'amélioration des assemblages rivés par l'adjonction de cordons latéraux, la préférence donnée aux assemblages avec couvre-joints, etc. Les essais d'endurance ont fortement contribué à l'amélioration de la construction soudée. Pour construire d'une manière vraiment adaptée au soudage, il faut d'abord éviter tout ce qui peut défavorablement influencer la durabilité. Les connaissances acquises au cours des essais d'endurance ont modifié la construction des ouvrages soudés. Le constructeur s'est de plus en plus débarrassé des formes propres à la rivure. Il a appris à composer les ouvrages d'un petit nombre de pièces, faciles à souder, à éviter ou à réduire les accumulations de soudures, les déviations de forces par des couvre-joints ou des changements brusques de direction, les accumulations de tensions par variation brusque des sections. Il a appris en outre à réduire à un minimum la longueur et la section des soudures à cause des contraintes provoquées inévitablement par la chaleur et le retrait.

La forme la plus employée dans la construction des ponts est actuellement la poutre à âme pleine composée de tôles et de profilés spéciaux de largeur et d'épaisseur différentes. De nombreuses réalisations prouvent que la soudure convient parfaitement aux ponts en poutres à âme pleine. Grâce à l'initiative du Dr. Ing. e. h. et Dr. techn. h. c. *Schaper*, les poutres à âme pleine soudées ont déjà franchi des portées de 54 m (Rügendamm).

Pour les petites et moyennes portées, les poutres soudées à section en I sont exécutées suivant le modèle des poutres laminées. On est seulement beaucoup plus libre dans le choix des dimensions car on n'est pas lié à certains rapports pour des raisons de laminage. A côté des sections en I on a aussi les sections en caisson.

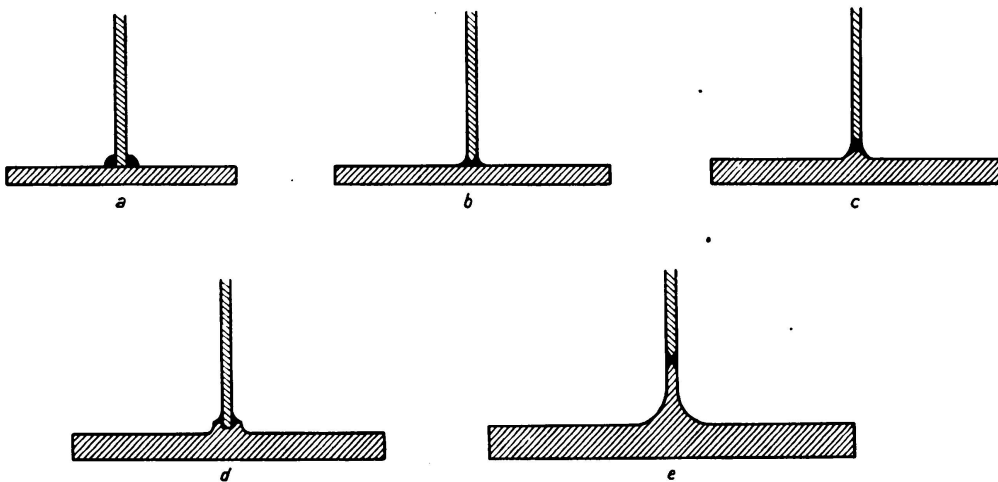


Fig. 4.

Dans les premières poutres à âme pleine soudées (fig. 4), les membrures étaient fixées à l'âme par des soudures d'angle pleines (fig. 4a). L'expérience et

les essais ont conduit à chanfreiner l'âme et à exécuter des deux côtés des soudures d'angle concaves (fig. 4b), mais dans le cas d'une âme épaisse on a rencontré des difficultés dans l'exécution de la racine. On a passé alors à la confection de profilés spéciaux pour les semelles, parmi lesquels nous citerons ceux de la Dortmunder Union avec soudures d'angle (fig. 4d) et ceux du Dr. Dörnen (fig. 4c) et de Krupp, soudés bout à bout avec l'âme. En déplaçant les cordons de gorge dans la zone où les sollicitations sont plus faibles et en prévoyant une transition douce de l'âme aux semelles, les contraintes seraient plus favorables dans les cordons de gorge et l'on éviterait les entailles dans les membrures (fig. 4e). Ce dernier type présente encore un autre avantage, la soudure étant éloignée de la semelle, l'examen et la radioscopie du cordon sont facilités.

Pour des raisons d'économie, on ne peut pas renoncer, dans les poutres de grande portée, à graduer la section des membrures suivant l'allure des moments. Autrefois, on ajoutait des semelles les unes au-dessus des autres et on les reliait par des soudures d'angle (fig. 5). Cette disposition n'est pas parfaite du point de

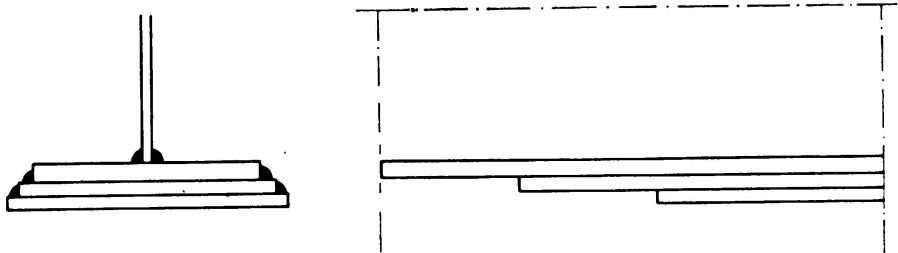


Fig. 5.

vue constructif parce que seule la semelle intérieure du paquet est fixée à l'âme, parce que la liaison de larges tôles par des soudures d'angles latérales est insuffisante et parce que les semelles se gondoleront lors de l'exécution des soudures d'angle, ce qui augmente le danger de voilement dans la zone comprimée. Ces inconvénients sont réduits lorsque l'on prend des semelles d'épaisseurs différentes reliées par des soudures bout à bout avec transition douce (fig. 6). L'épaisseur

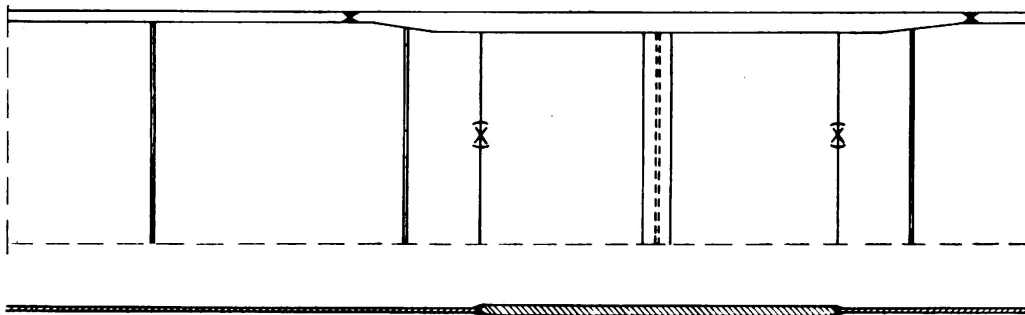


Fig. 6.

est généralement placé vers l'intérieur afin de conserver une surface extérieure plane. L'emploi de profilés à téton et à nervure avec semelles placées à l'intérieur donne aussi de bons résultats (fig. 7a, b, c). La partie d'âme faisant corps avec la membrure doit être suffisamment haute et forte afin que le cordon de gorge soit toujours accessible et afin que l'on puisse y fixer par des soudures

bout à bout les semelles de renforcement des membrures. Cette disposition garantit un écoulement parfait des forces entre les membrures et l'âme. Un autre progrès dans le sens d'une adaptation aux moments de la section des membrures, est représenté par l'emploi de semelles à nervure en croix (fig. 7 d); ces semelles permettent d'appliquer des deux côtés des tôles supplémentaires qui peuvent être fixées aux nervures par des soudures de bout. Dans les ponts-route, ces semelles

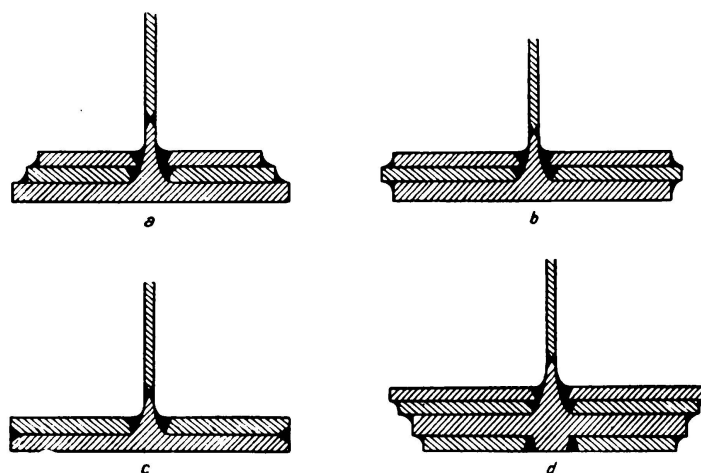


Fig. 7.

spéciales permettent de fixer par des soudures de bout les tôles cintrées et embouties (fig. 8); dans les ponts-rails elles permettent un appui centré des traverses¹ (fig. 9). Les raidisseurs des âmes jouent également un rôle dans l'aspect général des poutres soudées. On emploie de simples tôles ou des

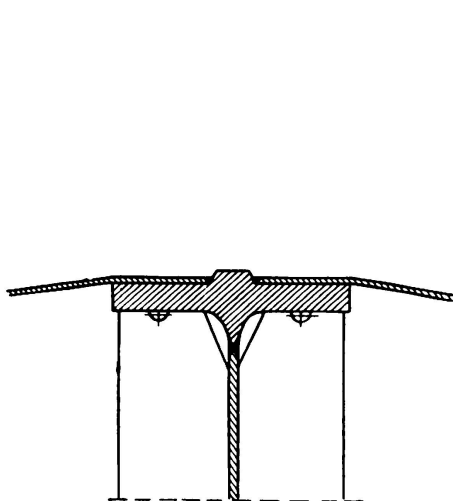


Fig. 8.

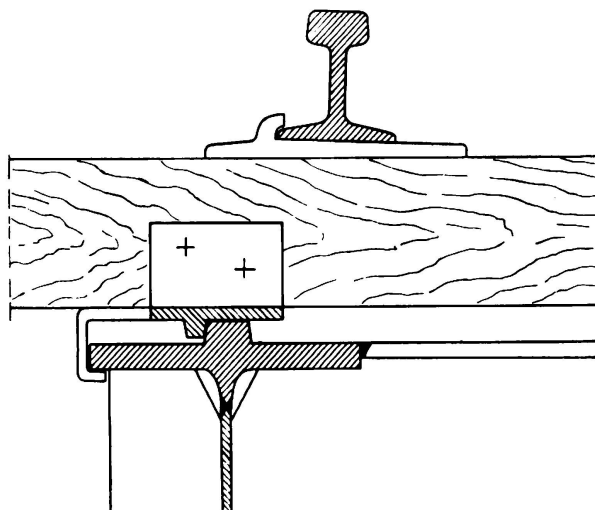


Fig. 9.

profilés en T ou en I pour raidir les hautes âmes. On peut renoncer à l'alternation des cordons lorsque l'épaisseur de l'âme est de plus de 16 mm. Afin de ne pas avoir une soudure sur le cordon de gorge, on coupe les angles intérieurs des raidisseurs. Dans la zone tendue on intercale de petites plaques d'appui fixées

¹ Schaechterle: Der geschweißte Vollwandträger. Beitrag zur Gestaltung von geschweißten Brücken. Bauingenieur, 17^e année, fasc. 15/16, p. 131 et ss.

aux raidisseurs par des soudures d'angle; on évite ainsi tout affaiblissement de la membrure tendue. Dans les ponts à tablier placé en haut, il est bon d'assembler la membrure supérieure des entretoises normales ou en cadre aux poutres principales par une soudure bout à bout, ainsi que de souder complètement l'âme du cadre à la poutre principale. Les forces sont ainsi transmises sans discontinuité de l'entretoise à la poutre-maitresse (fig. 10).

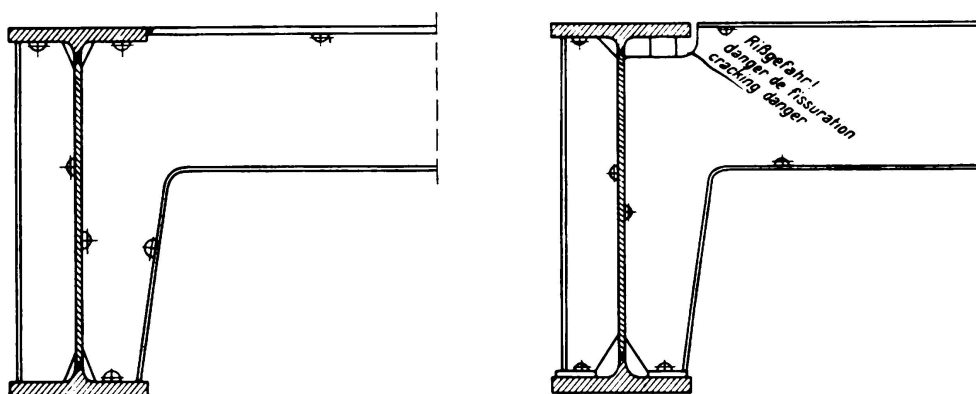


Fig. 10.

III. Un autre problème n'est pas encore résolu à l'heure actuelle, celui des contraintes de retrait provenant du soudage. Il n'est pas parlé de ces contraintes dans les règlements officiels quoiqu'elles puissent atteindre des valeurs élevées, ainsi que nous l'a montré l'expérience et quoique, pour des aciers mal choisis et une mauvaise succession du soudage, elles puissent même provoquer des fissures. Dans les essais, la question des contraintes de retrait est un peu trop négligée. Il s'agit donc d'étudier la grandeur des contraintes de retrait dans les ouvrages et leur influence sur l'endurance. Les contraintes internes menacent les constructions lorsque le soudage amorce des fissures. Les échecs qui nous sont connus sont à attribuer :

1° à des soudures à haute teneur en carbone et en silicium avec erreurs de laminage, spécialement des entailles très fines, des pores, etc.

2° à une exécution non appropriée, par ex. pliage à froid de profilés rigides,

3° à un traitement thermique inexact où les contraintes de retrait et de refroidissement s'additionnent,

4° à des pointes de tension produites par le croisement de plusieurs soudures, par des variations brusques de section, etc.

Dans la pratique, il faut d'abord apprendre à lutter contre les contraintes de retrait. Le processus de soudage est à déterminer exactement, en se basant sur l'expérience et les essais.

Lorsque les pièces assemblées par soudage ne peuvent pas se mouvoir, on a des contraintes de retrait. L'étirement à froid peut annuler jusqu'à un certain point les contraintes de retrait. Les conditions sont cependant différentes de celles qui existent dans les profilés laminés avec contraintes de laminage et de refroidissement. Les contraintes de retrait peuvent atteindre des valeurs beaucoup plus élevées dans certains cas défavorables. Lors du soudage des poutres, il faut donc tout essayer pour réduire dans la plus forte mesure possible les contraintes

de retrait. Déjà dans la préparation des tôles ou des pièces destinées à un assemblage soudé, il faut adopter des mesures garantissant une exécution parfaite des soudures. Dans la construction des ponts on n'emploie qu'exceptionnellement des tôles de moins de 8 mm, l'assemblage par simple trait de soudure disparaît donc. Pour exécuter les soudures en V, en X ou en U il faut soigneusement usiner les arêtes des tôles à assembler afin que la section de la soudure soit égale sur toute la longueur du cordon et afin de n'avoir aucune accumulation de métal d'apport. La racine doit avoir une largeur minima de 2 mm pour garantir un soudage parfait de la racine et pour éviter un fraisage trop profond lors de l'usinage de la racine. Lors de l'exécution des cordons de soudure, les pièces doivent être placées de telle sorte que les mouvements soient possible dans la direction principale du retrait et qu'en même temps les refoulements soient limités à un minimum. L'épaisseur des tôles à assembler est à prendre en considération dans le choix des électrodes. Plus les tôles sont épaisses, plus des électrodes doivent être épaisses. Le danger de fissuration est le plus grand pour la première passe de la soudure, c'est pourquoi il faut faire très attention lors du soudage préliminaire avec de minces électrodes. La soudure en V est employée pour les tôles minces et pour les tôles épaisses lorsqu'il est impossible de retourner la pièce. Pour les tôles épaisses la soudure en U présente par rapport à la soudure en V l'avantage d'exiger moins de métal d'apport. On l'emploie quand on peut retourner les pièces, puis pour les soudures verticales et quand le soudage au plafond est admis. Le retrait angulaire est supprimé en soudant en même temps ou alternativement des deux côtés les différentes passes. Afin que les deux moitiés de la soudure soient égales, il faut que la partie soudée en premier lieu et dont on usinera la racine soit plus grande. Si la partie inférieure du cordon doit être soudée au plafond, il est bien de placer la racine au tiers

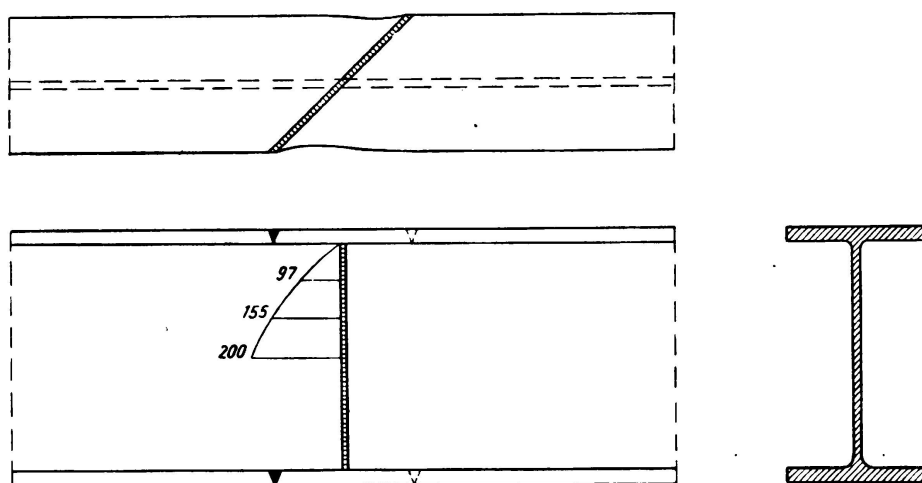


Fig. 11.

à partir du bas. Les joints bout à bout doivent être autant que possible perpendiculaires à l'axe de la poutre car cette solution exige moins de métal d'apport. Des poutres en I à larges ailes, assemblées par des soudures bout à bout obliques, ont subi un fort retrait et leur âme s'est en partie fendue à partir de la soudure (fig. 11). De tels inconvénients ne se sont pas présentés lorsque les soudures

bout à bout étaient perpendiculaires à l'axe. Des raidisseurs et des entretoises placés des deux côtés seront fixés à l'âme par de faibles cordons d'angle. De même que pour les soudures en X, on peut lutter contre le retrait angulaire dans les soudures d'angle doubles en choisissant une succession appropriée du soudage. Outre le retrait angulaire, on a encore du retrait transversal et longitudinal. Lorsque les cordons de soudure sont longs, on commence au milieu et l'on soude en même temps vers les deux bouts. Le soudage à pas de pèlerin est peu employé dans la construction des ponts car il peut facilement être cause d'erreurs. En chauffant les parties terminées il est possible de réduire le retrait transversal et la mise en tension qui en résulte. Si l'on interrompt le chauffage lorsque toute la soudure est exécutée, le retrait transversal se produit en même temps sur toute la longueur de la soudure et il ne peut engendrer qu'un raccourcissement de toute la pièce, en admettant que les éléments puissent se déplacer facilement et sans entrave.

A part le retrait dans le cordon de soudure même, il se produit des allongements puis des retraites dans les zones situées des deux côtés de la soudure. Ceux-ci ne peuvent pas être réduits par un chauffage additionnel; un chauffage avant et après le soudage ne peuvent qu'égaliser les contraintes dans le cas le plus favorable. En posant les pièces sur des appuis mobiles, on assure un allongement libre durant le chauffage préliminaire et un rétablissement durant le retrait.

La mobilité des pièces à assembler par soudage est facile à réaliser à l'atelier. L'âme et les membrures seront donc soudées pour soi à l'atelier en longues pièces puis assemblées en poutre et l'on exécutera alors les soudures de gorge. On peut souder les raidisseurs avant les cordons de gorge, ce qui décharge ces derniers tandis que si on les soude après, le retrait de l'âme par rapport aux membrures engendre des contraintes additionnelles dans les soudures de gorge. D'autre part, des raidisseurs bien adaptés empêchent le retrait transversal en cet endroit et les membrures deviennent ondulées. Même le préchauffage de la partie médiane de l'âme ne supprime pas cet inconvénient. Si par contre on donne du jeu aux raidisseurs il faut préparer une série de petites plaques d'appui d'épaisseurs différentes pour compenser les petits allongements engendrés par le retrait. Lorsqu'il existe un espace entre la membrure et le raidisseur, il est faux d'exécuter la liaison en soudant cet espace car, dans ce cas, la membrure est attirée. Dans la construction d'une poutre, les retraites longitudinales dans la soudure se font remarquer par un raccourcissement de la pièce. Du fait que le retrait longitudinal croît avec la longueur du cordon de soudure, on exécutera les soudures de gorge à partir du milieu vers les extrémités. Il est avantageux d'assembler en même temps les deux membrures à l'âme ou d'exécuter alternativement les deux cordons de gorge. On évite ainsi une déviation unilatérale de l'âme.

Dans bien des types de ponts, par ex. avec tablier en tôles cintrées, embouties ou plates soudées, il y a une accumulation de soudures dans la membrure supérieure des poutres du tablier. Le retrait longitudinal engendre un raccourcissement des membrures supérieures et par le fait même un fléchissement des poutres, il est donc nécessaire de donner à ces poutres une contre-flèche additionnelle.

Les poutres continues de grande longueur et de fortes dimensions doivent être assemblées sur le chantier, ce qui l'on a réalisé jusqu'à présent grâce à des dispositifs rotatifs. Cette installation présente cependant un inconvénient, elle offre une grande résistance aux mouvements dans le sens perpendiculaire aux dispositifs rotatifs, ce qui entrave le retrait longitudinal. Actuellement on appuie les pièces durant le soudage de telle sorte qu'elles puissent se mouvoir dans le sens longitudinal; les éléments à assembler à la pièce fixe peuvent ainsi suivre le retrait. Avec ce type de montage on ne peut pas éviter les soudures au plafond qui, dans l'état actuel de nos connaissances, n'offrent plus aucune difficulté. Quant à la succession à adopter dans le soudage des différents cordons on peut appliquer la règle suivante: il faut souder en dernier lieu le cordon qui oppose la plus grande résistance à un déplacement de la pièce. Les points des membrures sont disposés en général des deux côtés du joint de l'âme. Les soudures de gorge entre la membrure et l'âme restent jusqu'à la fin ouvertes sur une grande longueur afin que les retraits dans l'âme et la membrure puissent s'effectuer indépendamment les uns des autres. On commence par souder en même temps les deux cordons des membrures et l'on agrandit la distance des racines du cordon de l'âme, de telle sorte qu'après le retrait des premières passes des cordons situés sur les membrures, il soit encore possible d'exécuter parfaitement le cordon d'âme. En soudant alternativement le cordon de membrure et le cordon d'âme on peut lutter contre une accumulation de contraintes et on peut obtenir une égalisation entre les contraintes de compression et de traction. Le retrait de chaque passe suivante du cordon de membrure engendre de la compression dans la passe précédente du cordon d'âme, les contraintes de traction engendrées par le retrait du cordon d'âme sont ainsi partiellement absorbées. Ce processus se répète pour chaque passe qui suivra et il ne reste finalement que les contraintes engendrées par le dernier cordon et la plus grande soudure. C'est pourquoi on procède souvent de la façon suivante dans la pratique: on exécute d'abord un tiers de chaque soudure de membrures puis on soude les $\frac{2}{3}$ du cordon d'âme; ensuite on termine en même temps les cordons de membrures et le cordon d'âme et finalement on exécute le cordon de gorge.

IV. Au cours de ces dernières années on a exécuté bien des ponts entièrement soudés. Ces ponts sont caractérisés par une poutre continue droite et une forme simplifiée à l'extrême. Au point de vue esthétique, les ouvrages soudés sont de beaucoup supérieurs aux ouvrages rivés.