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

Band: 4 (1952)

Artikel: Vorwärmungsmassnahmen bei der Schweissung von vollwandigen Stahlträgern im Brückenbau

Autor: Erega, J.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-5045

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: 03.09.2025

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

BI 2

Vorwärmungsmassnahmen bei der Schweissung von vollwandigen Stahlträgern im Brückenbau

Preliminary heating adopted when welding solid-web steel girders in bridge construction

Le chauffage préalable dans la soudure des poutres pleines des ponts métalliques

DIPL. ING. J. EREGA
Zagreb

ALLGEMEINES

Die Sicherheit der geschweissten Bauwerke hängt von vielen Umständen ab. Das allgemeine Streben, besonders nach den erfolgten Rückschlägen im geschweissten Brückenbau (und auch auf anderen Gebieten) geht dahin, dass man möglichst verformbare Verbindungen mit mässigen inneren Spannungen herzustellen versucht. Die mehrachsigen Spannungszustände sollen dabei möglichst vermieden werden und die geschweissten Bauwerke müssen über genügende plastische Reserven verfügen.

Zur Erreichung dieser Ziele stehen zur Zeit neben einer entsprechenden konstruktiven Ausbildung der Bauwerke auch die im besonderem Verfahren erschmolzenen Grundwerkstoffe, sowie verschiedene thermische Massnahmen während und nach der Herstellung derselben, zur Verfügung.[1, 2]

Die beachtlichen Vorteile der Vorwärmung [1, 3] sowie die anscheinende Möglichkeit freier Wahl der Vorwärmungstemperaturen den Stahleigenschaften entsprechend, führten zu der versuchsweisen Anwendung der Wärmemassnahmen auch im geschweissten Brückenbau.

Das Vorwärmen erfolgte entweder mit offener Flamme in der Werkstätte, oder wo es möglich war auch in Vorwärmungsöfen.[2]

Bei der Wahl höherer Vorwärmungstemperaturen wurden die Schweisser durch die ausstrahlende Wärme stark belästigt und auch de Güte ihrer Arbeit wurde dadurch beeinträchtigt. Ungleichmässige Erwärmung und Abkühlung der Stahlteile verschiedener Stärke und Abmessungen, führte noch im Laufe der Arbeit zu grossen zusätzlichen Beanspruchungen und teilweise auch zu unzulässigen Verwerfungen und Risseerscheinungen.

[1] Siehe Literaturverzeichnis am Ende des Beitrages.

Die praktischen Erfahrungen zeigten im Allgemeinen die verhältnissmässig grosse Empfindlichkeit der Wärmemassnahmen.[1] Infolgedessen blieb die Anwendung derselben im Brückenbau, trotz grosser Vorteile, auf vereinzelte Ausnahmen beschränkt.

Das Spannungsfrei- und das Normalglühen fanden im Brückenbau auch nur sehr beschränkte Anwendung.

Als leicht durchführbar haben sich bewährt: das pausenlose Schweissen, die Mehrlagenschweissung, die Anwendung stärkerer Elektrodendurchmesser und das Nachwärmen der einzelnen Schweissraupen.

Durch gleichzeitige Anwendung beider Verfahren, des Vor- und des Nachwärmens, lassen sich in Sonderfällen recht günstige Ergebnisse erzielen.

Beim pausenlosen Schweissen und bei der Anwendung von stärkeren Elektrodendurchmessern wird die "natürliche" Schweisswärme ausgenützt. Bei der Mehrlagenschweissung werden ausserdem noch die unteren Lagen durch die oberen ausgeglüht.[4]

Um die Vorteile der Wärmemassnahmen praktisch besser ausnützen zu können, bei gleichzeitiger Vermeidung der erwähnten Mängel, wurde seinerzeit von uns das Verfahren der "Zonen- und streifenweisen Vorwärmung" entwickelt und mit bestem Erfolge praktisch angewandt.[5, 6, 7, 8]

Das Wesentliche des Verfahrens besteht darin, dass man die Vorwärmungstemperatur begrenzter Konstruktionsbereiche nur so hoch wählt, dass die während der Arbeit entstehenden zusätzlichen Temperaturspannungen unterhalb der Streckgrenze bleiben und dass nach erfolgtem Temperaturausgleich (bezw. nach der Abkühlung) die verbundenen Konstruktionsteile spannungslos bleiben (abgesehen von den sogenannten "natürlichen Schweissspannungen").

Infolge der begrenzten praktisch möglichen Temperaturhöhe der Vorwärmung werden nach Bedarf auch andere, vorher erwähnte thermische Massnahmen, angewandt. Das pausenlose Schweissen wird zur Regel gemacht. Jede tragende Naht muss mindestens in zwei Lagen ausgeführt werden (auch bei tragenden Kehlnähten). In Sonderfällen, gelangt zusätzlich auch noch das Nachwärmen der Schweissraupen im Laufe der Arbeit, zur Ausführung.

Die Schweisspläne müssen genaue Angaben auch über die Höhe der Vorwärmungstemperatur und über die Abmessungen der vorzuwärmenden Bereiche enthalten.

Die Befürchtungen hinsichtlich der möglichen Schäden in den Uebergangszonen, als Folge der Wärmemassnahmen,[1] sind nach Ansicht des Verfassers nicht genügend begründet. Bei jedem Schweissvorgang kommt es beim Fortschreiten der Wärmewelle zu Reckungen des Werkstoffes auch im Blaubruchgebiet.

Wir haben zahlreiche Verbindungen mit Werkstoffen verschiedener chemischen Zusammensetzung, verschweisst unter Anwendung verschiedener Vorwärmungstemperaturen, auch mit Magnetpulververfahren geprüft. In keinem einzigen Falle konnten wir irgendwelche Schäden dieser Art feststellen.

Im Nachstehenden wird der Arbeitsvorgang an den für den Brückenbau wichtigsten Verbindungen näher beschrieben.[6, 7, 8]

Der einfache Gurtplattenstoss

Bei der Ausführung des einfachen Gurtplattenstosses hat man in der Wahl der geeigneten Höhe der Vorwärmungstemperatur meistens freie Hand. Man beachte jedoch das Grundprinzip, dass die Vorwärmungstemperatur nur so hoch als unbedingt notwendig genommen werden soll.

Die zweckmässigste Vorwärmungstemperatur wird auf Grund der Vorversuche bestimmt. Wenn bei der stufenweisen Erhöhung der Temperatur kein merklicher Unterschied der physikalischen Eigenschaften und insbesondere keine weitere Vergrösserung der Plastizität der Verbindung erzielt werden kann wähle man lieber die nächsttiefere Temperatur.

Beim einfachen Gurtplattenstoss soll die Vorwärmungstemperatur nach unseren Erfahrungen etwa zwischen 150° bis 300° C. liegen, und richtet sich dabei nach dem Werkstoff und der Stärke der Gurtplatten, Höhere Temperaturen sind wegen Verwerfungsgefahr nicht empfehlenswert.

Beim einfachen Gurtplattenstoss kann das Vorwärmen mit offener Flamme (Naphtabrenner und dergleichen) ohne Schwierigkeiten durchgeführt werden. Es handelt sich hauptsächlich darum, die vorzuwärmende Länge der Platten richtig abzuschätzen.[8] Bei zu kurzen Vorwärmungsabschnitten kühlt die Platte auch beim pausenlosen Schweissen zu schnell ab, und das Vorwärmen muss zu oft wiederholt werden. Dadurch entstehen erstens grössere Kosten, und ausserdem wird auch, solange das Schweissgut in der Verbindung noch schwach ist, die Rissegefahr stark erhöht.

Vor dem Schweissen der Wurzellage empfiehlt es sich die Gurtplatten auf je 1,0 m. Länge vorzuwärmen und beim späteren Wiederholen auf je etwa 0,60 m.

Bei stärkeren (dickeren) Gurtplatten muss das Vorwärmen mit offener Flamme, möglichst symmetrisch von beiden Seiten und nicht zu schnell, vorgenommen werden. Bei unvorsichtigem Vorwärmen kommt es leicht zur Ueberschreitung der zulässigen Spannungen und auch zu Verwerfungen.

Die ersten Lagen müssen ohne Unterbrechung geschweisst und die Wurzellage möglichst auch sofort ausgekreuzt und nachgeschweisst werden. Nochmaliges Vorwärmen mit dem Naphtabrenner, solange die Wurzel noch nicht ausgekreuzt und nachgeschweisst ist, darf wegen Rissegefahr nicht ausgeführt werden. Falls nötig, kann die Naht selbst und die nächste Umgebung vorsichtig mit der Schweisspistole vorgewärmt werden.

Wenn Stahlteile verschiedener Stärke gleichzeitig mit offener Flamme vorgewärmt werden müssen besteht die Gefahr, dass die schwächeren Teile bei mangelhafter Vorsicht leicht übermässig stark erhitzt werden. So lange das Schweissgut noch keine genügende Stärke hat, ist dies beim einfachen Gurtplattenstoss auch der Fall. Durch genügend flache Neigung des Brenners wird diese Gefahr beim Gurtplattenstoss, beseitigt.

Wenn das Schweissgut eine Stärke von 10–15 mm. erreicht, macht das weitere Vorwärmen keine Schwierigkeiten mehr.

Verbindung von Gurtungen mit dem Stegblech

Vor Beginn der Vorwärmung müssen die Gurtungen mit dem Stegblech genügend stark geheftet werden. Die Heftschweissungen müssen von geübten Schweissern in zwei Lagen, wie jede tragende Naht, ausgeführt werden. Auch beim Heften müssen die Gurte stellenweise und zwar von aussen mit der Schweisspistole auf etwa 100–150° C. vorgewärmt werden. Beim Vorwärmen von innen (Stegblechseite) sind auch bei Anwendung der Schweisspistole stellenweise Erhitzungen des Stegbleches, sowie spätere Zugrisse in den Heftschweissungen, unvermeidlich.

Beim Vorwärmen mit offener Flamme werden in der Regel nur die Gurtungen und zwar abschnittsweise (die Stegbleche nur bei kühler Witterung) vorgewärmt. Das Vorwärmen der Gurtungen allein ist wesentlich leichter durchzuführen, als das Vorwärmen ganzer Trägerabschnitte.

Beim Vorwärmen der Gurtungen oder beim schnelleren Abkühlen des Stegbleches von gleicher Anfangstemperatur entstehen in den Gurtplatten zusätzliche Druck-, in dem Stegblech Zug- und in den Heftschweissungen zusätzliche Schubspannungen.

Beim Schweissen der ersten Lage der ersten Kehlnaht wird die praktisch mögliche Höhe der Vorwärmungstemperatur durch die Tragkraft der Heftschweissungen begrenzt. Bei der Bemessung der Heftschweissungen muss beachtet werden, dass auch bei dichtem Heften (etwa 50–60 cm. voneinander entfernt) die ganze zeitweilige Schubkraft von zwei bis höchstens drei Heften übernommen werden muss.

Der zulässige Temperaturunterschied zwischen Gurtungen und Stegblech wird dadurch auf etwa 35–45° C. begrenzt. Bei einer mittleren Raumtemperatur von etwa +15° C. beträgt die praktisch mögliche Vorwärmungstemperatur der Gurtplatten bei der Ausführung der ersten Lage demnach etwa 50 bis 60° C. Bei dieser kleinen Vorwärmungstemperatur muss die erste Lage unbedingt ohne Pausen mit stärkeren Elektroden (4–5 mm., je nach der Plattenstärke) geschweisst werden. Ausserdem muss die Ansatzstelle vor Arbeitsbeginn noch örtlich vorgewärmt werden (um weitere 100° C.). Dasselbe gilt bei unvermeidlichen Arbeitsunterbrechungen.

Wenn sich bei der Ausführung der ersten Lage, trotz obiger Massnahmen, Risseerscheinungen in grösserem Umfange zeigen sollten, was bei sehr starken Gurtplatten vorkommen kann, müssen die eben gezogenen Schweissraupen mit der Schweisspistole nachgewärmt werden. Zum Nachwärmen soll die Zeit während des Elektrodenwechsels ausgenützt werden. Gleichzeitiges Nachwärmen und das Fortsetzen des Schweissens, sind wegen starker Blaswirkungen nicht möglich.

Die Wahl kleiner Vorwärmungstemperaturen bei der ersten Lage ist ohne Bedenken möglich. Durch die ausglühende Wirkung der nächsten Lage werden die Struktur der ersten Lage und der Uebergangszonen verbessert und die inneren Spannungen teilweise abgebaut.

Bei der Ausführung der zweiten Lage sind etwaige Risseerscheinungen kaum zu befürchten. Die Vorwärmungstemperatur kann erhöht werden. Die Höhe der Vorwärmungstemperatur und die Länge der vorzuwärmenden Abschnitte werden durch zweierlei Umstände beschränkt. Durch zu hohe Temperatur werden erstens die Schweisser zu stark belästigt und zweitens besteht auch Verwerfungsefahr für den vorgewärmten Trägerteil. Dasselbe gilt auch bei Wahl von zu langen Vorwärmungsabschnitten.

Der Temperaturunterschied zwischen Gurten und Stegblech kann hier unbedenklich mit 55–75° C. und die Vorwärmungslänge mit 3–4,0 m. gewählt werden. Bei einer Raumtemperatur von +15° C. entspricht das der Vorwärmungstemperatur von nur 70–90° C. Auch bei der Ausführung der zweiten Lage muss deshalb ohne Pausen mit stärkeren Elektroden (5–6 mm.) geschweisst werden. Vor Arbeitsbeginn und bei Unterbrechungen muss die Anfangsstelle stärker vorgewärmt werden.

Durch gleichzeitige Anwendung von mehreren thermischen Massnahmen lassen sich in der Mehrzahl der Fälle, auch bei mässigen Vorwärmungstemperaturen, zufriedenstellende Ergebnisse erzielen.

Es muss noch betont werden, dass das Vorwärmen mit offener Flamme bei der Ausführung der Kehlnähte an die Geschicklichkeit der Arbeiter ziemlich grosse Anforderungen stellt. Eine weitere Entwicklung der Arbeitsmethoden wäre hier wünschenswert.

Bei der Ausführung der Savebrücke Zagreb, wurden von Prof. Dr. Šahnazarov am fertigen Bauwerk umfangreiche Messungen der Brinellhärte durchgeführt.[9]

Bei Gurtplattenverbindungen von 95 und 70 mm. Stärke konnten keine Unterschiede in der Härte der Uebergangszonen und ihrer näheren Umgebung festgestellt

werden. Die Härtezunahme in den Uebergangszonen der Kehlnähte, gezogen auf 95 und 70 mm. starken Platten, war trotz niedriger Vorwärmungstemperaturen nicht grösser, als bei wesentlich stärker vorgewärmten Gurtplattenverbindungen.

Die Messungen ergaben folgende mittlere Brinellhärten:

	Uebergangszone	Stahl St. 44
Kehlnähte, 95 mm. Platten . . .	~158±10%	~126±12%
„ 70 mm. „ . . .	~156± 9%	
Gurtplattenverbindung, 95 mm. . .	~173± 5%	~133± 5%
„ 70 mm. . .	~177± 5%	~136± 5%

Die Gurtplattenverbindungen samt näherer Umgebung wurden etwa 2 mm. tief abgeschmirgelt und die oberste entkohlte Schicht entfernt. Dadurch ergab sich bei den unbearbeiteten Kehlnahtverbindungen etwas kleinere Härte der Uebergänge und des Stahles.

Mit Rücksicht auf die grosse Anzahl der untersuchten Verbindungen können die angeführten Messergebnisse als ein praktischer Beweis für die Güte und Zweckmässigkeit der empfohlenen Arbeitsmethoden gelten.

Die Grösse der durch die Vorwärmung der Gurtungen entstehenden inneren Kräfte kann für praktische Bedürfnisse genügend genau nach folgenden vereinfachten Ausdrücken abgeschätzt werden.[6]

In den Ausdrücken bedeuten:

T_t die Schubkraft zwischen Gurt und Stegblech
$\sigma_{t,G}$ die mittlere Temperaturspannung in den Gurtplatten
$\sigma_{t,S}$ die mittlere Temperaturspannung im Stegblech
F_G den Querschnitt einer Gurtlamelle
F_S den Querschnitt des Stegbleches
Δ_T den Temperaturunterschied zwischen Gurten und Stegblech
α_t den Temperaturdehnungskoeffizient
E den Elastizitätsmodul des Werkstoffes
Iw das Trägheitsmoment des nicht vorgewärmten Querschnittsteiles
Y_o, Y_u die Entfernungen des Schwerpunktes dieses Querschnittsteiles vom oberen bezw. vom unteren Rande des Trägers

Wenn beide Gurtungen symmetrisch, abschnittweise auf eine um ΔT höhere Temperatur als das Stegblech gleichmässig vorgewärmt werden, ergibt sich annähernd:

Die Schubkraft:

$$T_t=\frac{\alpha_t \Delta T E}{\frac{1}{F_G}+\frac{2}{F_S}} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (1)$$

Die Spannungen:

$$\sigma_{t,G}=-\frac{\alpha_t \Delta T E}{1+\frac{2F_G}{F_S}}; \quad \sigma_{t,S}=\frac{\alpha_t \Delta T E}{1+\frac{F_S}{2F_G}} \quad \ldots\ldots \quad (2, 3)$$

Bei einseitiger, abschnittsweiser, gleichmässiger Erwärmung nur einer (z.B. der oberen) Gurtplatte auf eine um ΔT höhere Temperatur als diejenige des übrigen Trägerteiles ergibt sich annähernd unter Vernachlässigung der Biegesteifigkeit der erwärmten Gurtplatte:

Die Schubkraft:

$$T_t=\frac{\alpha_t \Delta T E}{\frac{Y_o^2}{I_w}+\frac{1}{F_G+F_S}+\frac{1}{F_G}} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (4a)$$

Die Spannungen:

In der oberen Gurtplatte: $\sigma_t', G = -\frac{T_t}{F_G}$ . . . . . (4b)

Im Stegblech oben: $\sigma_t', S = T_t \frac{Y_o^2}{I_w} + \frac{T_t}{F_G + F_S}$ . . . . . (4c)

In der unteren Gurtplatte: $\sigma_t, G = -T_t \frac{Y_o \, Y_u}{I_w} + \frac{T_t}{F_G + F_S}$ . . . . . (4d)

Das Vorzeichen minus bedeutet Druck.

Der Wert der thermischen Massnahmen kann sich praktisch nur dann in zufriedenstellender Weise auswirken, wenn dieselben ausnahmslos und streng konsequent in vollem Umfange durchgeführt werden. Dieser Grundsatz muss besonders bei der Ausführung der langen Kehlnähte beachtet werden.

Der Universalstoss des Trägers

Die Wärmemassnahmen bieten auch hier grosse Vorteile, nicht nur hinsichtlich der günstigeren Verschweissung der Stähle stärkerer Abmessungen überhaupt, sondern auch als praktisches Hilfsmittel für die leichtere Durchführung der Schweissung unter Verspannung. Ausserdem wird durch die Vorwärmungsmassnahmen eine günstigere Spannungsverteilung im fertiggeschweissten Universalstoss erzielt.

Die Vorteile der Wärmemassnahmen kommen besonders bei grossen Stärkeunterschieden zwischen Gurtungen und Stegblech zur Geltung.

Beim Anwenden der Wärmemassnahmen ist folgende Arbeitsweise empfehlenswert. Die Arbeit beginnt mit dem Schweissen der Gurtverbindungen unter Anwendung der Wärmemassnahmen wie beim einfachen Gurtplattenstoss. Nachdem eine solche Stärke der Gurtverbindungen erreicht worden ist, dass nachher gleichzeitiges Schweissen und Beendigung aller Verbindungen des Gesammtstosses möglich sein wird, beginnt man mit dem Schweissen der Stegblechverbindungen.

Vor dem Schweissen der Wurzellage in der Stegblechverbindung werden beide Gurtlamellen in einer bestimmten Länge auf etwa 100–150° C. vorgewärmt und die Bleche stark geheftet.

Beim Vorwärmen der teilweise verschweissten Gurtplatten öffnet sich die Spalte in der Stegblechverbindung um das vorher bestimmte Mass. Diese Grösse wird auf Grund der Vorversuche als Differenz des Schrumpfmasses der Stegblechverbindung und des Restes, der noch zu erwartenden Schrumpfung des Gurtplattenstosses, ermittelt.

Während der Ausführung der Wurzellage kühlen die Gurtungen langsam ab und unterstützen die Schrumpfung der Stegblechverbindung. Ausserdem kann auch das Stegblech nach erfolgtem Heften entsprechend vorgewärmt werden, um eine "freie" Schrumpfung der Wurzellage zu ermöglichen. Man kann ebenfalls nach dem Heften abwarten bis die vorgewärmten Gurtplatten auskühlen. Bei den Baustellenstössen, welche in den Drehvorrichtungen geschweisst werden, kann auch eine reichliche Dehnlänge des Stegbleches angenommen werden.

Bei der oben beschriebenen Arbeitsweise kommt es während der Ausführung des Gesammtstosses zeitweilig zu grösseren zusätzlichen inneren Spannungen, die nach der Fertigstellung und nach dem erfolgten Temperaturausgleich wieder verschwinden.

Bei der Feststellung der Schweissbedingungen sollen die Beanspruchungen in der Stegblechverbindung mässig gehalten werden, besonders so lange die Wurzel noch nicht ausgekreuzt und wieder zugeschweisst ist.

Während der Schweissung der ersten Lagen in der Stegblechverbindung kühlen die Gurtungen fast vollständig aus. Bevor mit der Arbeit an den Gurtverbindungen fortgefahren wird, müssen dieselben wieder auf die vorschriftsmässige Temperatur (von etwa 200–300° C.) erwärmt werden. In dieser Arbeitsphase kommt es zu der max Beanspruchung, der nur teilweise fertiggestellten Stegblechverbindung da die Vorwärmungslänge der Gurtplatten insgesammt nicht unter etwa $2 \times 0{,}60 = 1{,}20$ m. genommen werden soll.

Bevor mit dem Schweissen der Gurtverbindungen fortgefahren wird, muss entweder die Wurzel schon ausgekreuzt und wieder zugeschweisst sein, oder aber muss die Vorwärmung der Gurtverbindung vorsichtig, auf kleine Bereiche begrenzt, mit der Schweisspistole durchgeführt werden.

Auch im weiteren Verlauf der Arbeit muss das Vorwärmen mit entsprechender Vorsicht durchgeführt werden, damit örtliche Ueberbeanspruchungen des Stegbleches (besonders am Anfang der Kehlnähte) mit Sicherheit vermieden werden können. Ausserdem müssen die Gurtplatten durch Spannvorrichtungen gegen Ausknickung gesichert werden.

Bei der Ausführung der Baustellenstösse gibt es noch einige wichtige Einzelheiten zu beachten.[8] Die Hauptträgerteile müssen vor Schweissbeginn in die richtige Lage gebracht und durch Nivellement kontrolliert werden.

Zuerst sollen die unteren Gurtplatten vorgewärmt und durch die ersten Schweissraupen verbunden werden. Dabei werden die beiden Hauptträgerteile durch Spannvorrichtungen und Schrumpfung zusammengezogen.

Um die Schrumpfung bei den ersten Lagen in der Obergurtverbindung zu ermöglichen, muss die Verbindungsstelle vor dem Schweissen etwas angehoben werden. Die Grösse der Hebung ist durch die geometrische Beziehung zwischen der Länge der Trägerteile und der Schrumpfung der ersten Lagen bestimmt und kann auf Grund der Vorversuche ermittelt werden.

Während der Schweissung der ersten Lagen im Obergurte werden die Hebevorrichtungen langsam nachgelassen. Um etwaige Fehler in der Trägerachse zu vermeiden, müssen die unteren Gurtplatten vor dem Schweissbeginn auf genau dieselbe Temperatur und Länge wie der Obergurt vorgewärmt werden.

An der Savebrücke bewegten sich die Abweichungen von der vorgeschriebenen Mittellinie des Trägers innerhalb etwa ± 10 mm. Nur bei einer Verbindung war die Abweichung grösser und betrug etwa 17 mm. Bei dieser Verbindung unterlief ein Fehler, entweder bei der Hebung oder beim Vorwärmen.

Die Grösse der zusätzlichen Spannungen kann praktisch genügend genau aus folgenden einfachen Beziehungen entnommen werden.[6]

Es sei:

ΔT_o der anfängliche Temperaturunterschied zwischen den vorgewärmten Gurtplatten und dem Stegblech

ΔT_i der Temperaturunterschied zwischen beiden Konstruktionsteilen im Laufe der Arbeit

S_G die Gesammtschrumpfung der Gurtplattenverbindung

S_S die Gesammtschrumpfung der Stegblechverbindung

$\Delta S_{G,i}$ die Teilschrumpfung der Gurtplattenverbindung im Laufe der Arbeit

$\Delta S_{G,o}$ die Teilschrumpfung der Gurtplattenverbindung vor Beginn der Arbeit an der Stegblechverbindung

$\Delta S_{S,i}$ die Teilschrumpfung der Stegblechverbindung im Laufe der Arbeit

l_f die freie Dehnlänge des Stegbleches ohne Kehlnähte

l_t die Länge des vorgewärmten Abschnittes der Gurtplatten
$F_{S,v}$ der Querschnitt der Schweissnaht im Stegblech längs der Naht

Andere Bezeichnungen wie vorher.

Aus der Bedingung, dass die Verlängerung der Gurtplatten infolge der symmetrisch vorgenommenen Vorwärmung der Differenz der Schrumpfung der Stegblechverbindung und des Restes der noch zu erwartenden Schrumpfung des Gurtplattenstosses gleich sein muss, ergibt sich die Höhe der Vorwärmungstemperatur bei der nach praktischen Gesichtspunkten frei gewählten Länge der Vorwärmungsabschnitte zu:

$$\Delta T_o = \frac{S_S - (S_G - \Delta S_{G,o})}{\alpha_t\, l_t} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (5a)$$

Unter Einhaltung obiger Bedingung bleibt der fertiggeschweisste Universalstoss nach dem erfolgten Temperaturausgleich frei von zusätzlichen, durch die Wärmemassnahmen bedingten, zeitweiligen Spannungen.

Sollen im Gebiet der freien Dehnlänge des Stegbleches nachträglich Versteifungen, welche eine weitere Schrumpfung des Stegbleches um $S_{v,1}+S_{v,2}+\ldots$ zur Folge haben, angeschweisst werden, so beträgt die Vorwärmungstemperatur:

$$\Delta T_o = \frac{S_S + S_{v,1} + S_{v,2} + \ldots (S_G - \Delta S_{G,o})}{\alpha_t\, l_t} \quad \ldots\ldots \quad (5b)$$

In diesem Falle müssen die Versteifungen noch vor der Schliessung der Kehlnähte an das Stegblech angeschweisst werden.

Wenn man die Gurtlamellen vor Beginn der Schweissung an der Stegblechverbindung im Bereiche l_t symmetrisch und gleichmässig um ΔT_o vorwärmt, und die Formänderungen infolge des Vorwärmens, der Schrumpfung der Stegblech- und der Gurtplattenverbindung den durch die inneren Spannungen hervorgerufenen gleichsetzt, ergibt sich die mittlere Stegblechspannung:

$$\sigma_S = \frac{[-\alpha_t l_t(\Delta T_o - \Delta T_1) - (\Delta S_{G,i} - \Delta S_{G,o}) + \Delta S_{S,i}]E}{l_f\left(1+\frac{F_S}{2F_G}\right)} \quad \ldots \quad (6a)$$

oder auch in anderer Form:

$$\sigma_S = \frac{[+\alpha_t l_t \Delta T_1 + (S_G - \Delta S_{G,i}) - (S_S - \Delta S_{S,i})]E}{l_f\left(1+\frac{F_S}{2F_G}\right)} \quad \ldots\ldots \quad (6b)$$

Das positive Vorzeichen bezeichnet die Zugspannung.

Die durchschnittliche zusätzliche Spannung in der nur teilweise verschweissten Stegblechverbindung beträgt:

$$\sigma_{S,v} = \frac{F_S}{F_{S,v}}\,\sigma_S \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (6c)$$

Wenn Versteifungen vorhanden sind und die Anfangstemperatur ΔT_o nach (5b) berechnet wurde, muss in (6a), statt $\Delta S_{S,i}$ der Ausdruck: $(\Delta S_{S,i}+S_{v,1}+S_{v,2}+\ldots)$ eingesetzt werden.

In den vorherigen Beziehungen wurde stillschweigend vorausgesetzt, dass die Länge des vorgewärmten Abschnittes während der Arbeit annähernd konstant bleibt.

Verschiedene Verbindungen

Bei den Gurtungen, welche aus mehreren schwächeren Platten bestehen, ist das einwandfreie Vorwärmen praktisch nicht durchführbar. Die dünne Luftschicht

zwischen den einzelnen Platten verhindert die Wärmeübertragung. Beim Vorwärmen mit offener Flamme, werden auch bei vorsichtiger Arbeit die äusseren Platten zu stark erhitzt, während die mittleren noch nicht genügend erwärmt sind. Wenn man die Vorwärmung in einem Ofen vornimmt, kommt es infolge des grossen Unterschiedes in der Abkühlungsgeschwindigkeit der einzelnen Platten zu grossen zusätzlichen Beanspruchungen, welche in der Regel das Reissen der Kehlnähte noch während der Arbeit zur Folge haben.

Aehnliche Schwierigkeiten kommen auch vor, wenn schwächere Decklaschen auf massive Gurtplattenstösse durch Kehlnähte angeschweisst werden sollen. Das Reissen der Kehlnähte kann in diesem Falle nur dann vermieden werden, wenn die Decklaschen wesentlich schwächer erwärmt werden als die massiven Gurtplatten. Nach dem erfolgten Temperaturausgleich verbleiben aber in der Decklasche starke Druckspannungen, die bei grösseren Temperaturunterschieden bis an die Fliessgrenze reichen können.[9] In der Gurtverbindung werden dadurch beträchtliche Zugspannungen hervorgerufen.

Das Nachwärmen der Schweissnähte kommt meistens bei der Ausbesserung von Rissen oder zur Verhütung derselben bei Schweissungen unter starker Verspannung zur Anwendung.

Risse in der Wurzellage dürfen nicht überschweisst werden, auch dann nicht, wenn die Wurzel nachträglich ausgekreuzt und nachgeschweisst wird. Solche Risse müssen vor dem weiteren Schweissen ausgekreuzt und ausgebessert werden. Es empfiehlt sich folgendermassen vorzugehen:

Zuerst wird die Anfangs- und die Endstelle des ausgekreuzten Risses mit der Schweisspistole um etwa 100° C. stärker vorgewärmt, als die nächste Umgebung. Bei einer Temperatur der Schweissverbindung von 100° bis 150° C. beträgt die gesammte Vorwärmungstemperatur 200–250° C. Höhere Temperaturen sind nicht empfehlenswert. Geschweisst wird mit der 5 mm. starken Elektrode, in möglichst starker Lage. Gleich nach dem Legen wird die erste Raupe samt ihrer näheren Umgebung mit der Schweisspistole etwa $\frac{1}{2}$ bis 1 Minute lang nachgewärmt. Die Temperatur der zugeschweissten Stelle beträgt hiebei 300–400° C. Nach dem Entfernen der Schlacke wird sogleich die nächste Raupe gelegt und auch nachgewärmt. Wenn der ausgekreuzte Riss in seiner ganzen Länge zugeschweisst und von der Schlacke gereinigt ist, wird sofort auch die zweite in der Regel breitere Lage ausgeführt. Auch die zweite Lage soll in gleicher Weise nachgewärmt werden.

Mit dem eben beschriebenen Arbeitsvorgang hatten wir sehr gute Erfahrungen. Bei zahlreichen Versuchen und praktischen Ausführungen kam es bei derartiger Arbeitsweise nie zur Wiederholung der Risse.

Die Kostenfrage und das Verhalten der mit Anwendung der Wärmemassnahmen geschweissten Bauwerke im Betriebe

Die praktischen Erfahrungen mit grösseren, unter Anwendung der Vorwärmungsmassnahmen, geschweissten Brücken sind nicht zahlreich. In Jugoslawien wurden nur zwei grössere Brücken unter systematischer Anwendung der Wärmemassnahmen geschweisst, und zwar die Savebrücke bei Zagreb und die Mrežnica (Mreschnitza)-brücke bei Gen. Stol.

Die Unkosten für die Durchführung der Vorwärmungsmassnahmen mit offener Flamme betragen nach bisherigen praktischen Erfahrungen ungefähr ~70 kg. Naphta und ~9 Hilfsarbeiterstunden pro 1000 kg. der mit Vorwärmung geschweissten Vollwandstahlträger.

Für die Durchführung der Vorwärmungsmassnahmen bei geschweissten Brücken verlangten die jugoslawischen Werke im Jahre 1939–1940 Aufpreise von rund 30 Schweizerfranken pro 1000 kg.

Von den beiden oben erwähnten Brücken dient die Savebrücke auch heute noch, nach zwölfjährigem Bestehen, anstandslos dem öffentlichen Verkehr. Die Mreschnitzabrücke wurde während des Krieges, nach dreijährigem Bestehen, zerstört. Der rechte Uferpfeiler der Brücke wurde gesprengt. Nach dem Kriege wurde der stählerne Ueberbau abgetragen, teilweise noch nützlich verwendet und teilweise verschrottet.

Im Nachstehenden werden einige kennzeichnende Einzelheiten über die beiden, mit Vorwärmung geschweissten Bauwerke, mitgeteilt.

Savebrücke bei Zagreb [5, 6, 7] (Abb. 1)

Von fachlichem Interesse sind die ungünstigen Eigenschaften des Werkstoffes für die Herstellung der 220 m. langen Hauptträger und insbesondere die des Stahles für die 95 und 70 mm. starken, 500 mm. breiten Gurtplatten. Die über vier Oeffnungen von je 55,0 m. durchlaufenden Hauptträger wurden aus St. 44, und der Fahrbahnrost aus St. 37 hergestellt. Die Fahrbahnplatte aus Eisenbeton, fest mit den Hauptträgern verbunden, dient gleichzeitig auch als Windverband. Die Hauptträger und der Fahrbahnrost wurden ausschliesslich in geschweisster Bauweise hergestellt. Die Höhe der Hauptträger steigt von 2,20 m. in den Endfeldern bis 2,65 m. in der Mitte der Brücke an.

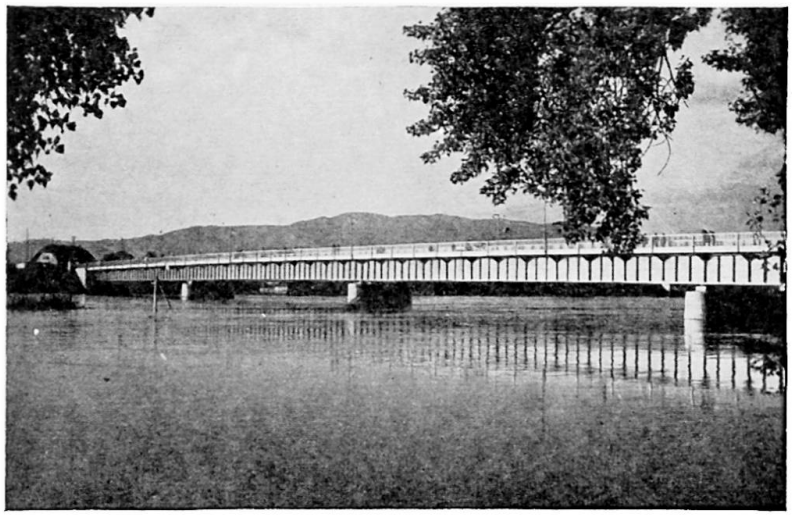

Abb. 1. Savebrücke Zagreb

Der Stahl für die Herstellung der Gurtungen (Lieferwerk: Witkowitze, Tschechoslowakei) war ein Thomasstahl in der S.M. Qualität mit C~0,25%, Mn~0,45%, Cu~0,20%, Cr~0,1%, P~0,037%, und S~0,035%.[11] Der C-Gehalt betrug im mittleren Drittel der Lamellenquerschnitte (die Späne wurden über die ganze mittlere Zone genommen) bis 0,27%.[9] Bohrlochanalysen der aus denselben Chargen gewalzten 12 mm. starken Bleche, ergaben vereinzelt C-Gehalte bis zu 0,33%.[9] Die Zugfestigkeit betrug σ_B~45,4 kg./mm.^{2}, die Bruchdehnung λ~23,5% [10] und die Güteziffer ~11.

Es wurde auch eine ausgesprochene Neigung dieses Werkstoffes zum Trennbruch

beobachtet. Bei der Prüfung der mit Mantelelektroden geschweissten Kehlnahtverbindungen wurden bei 4 Brüchen in Stahl, 3 ausgesprochene Trennbrüche beobachtet.[10] Die 3 Stäbe entstammten 3 verschiedenen Schmelzungen. Bei diesen Untersuchungen wurden die nur 12 mm. starken, nicht vorgewärmten Bleche durch Kehlnähte, gelegt an den äusseren Rändern der gerissenen Platten, miteinander verbunden. Geschweisst wurde mit 4 mm. starken Mantelelektroden mit Gleichstrom bei normaler Stromstärke (~180 A.). Die Bruchstellen waren etwa 30–40 mm. von der nächsten Schweissnaht entfernt.

Bei weiteren Untersuchungen erwies sich dieser Stahl als sehr temperatur- und alterungsempfindlich. Die Kerbzähigkeit des Bleches betrug im Anlieferungszustand bei +20° C. ~8–9 mkg./cm.^{2} und bei −16° C. ~1,3–1,4 mkg./cm.^{2} (Bruchquerschnitt 10×7,5 mm., Kerbradius 1,0 mm., Kerbtiefe 2,5 mm., Stützweite 40 mm.).[11]

Bei den, mit Vorwärmung auf ~200° C. geschweissten Stäben, betrug die Kerbzähigkeit in der Nähe der Naht bei +18° C. ~1,6–3,5 mkg./cm.^{2} und bei −16° C. ~0,3–0,4 mkg./cm.^{2} Wurden die geschweissten Stäbe um 2% kalt gereckt und 24 Stunden bei 250° C. gealtert, betrug die Kerbzähigkeit des Bleches in der Nähe der Schweissnaht bei +18° C. ~0,4–0,5 mkg./cm.^{2} und bei −16° C. ~0,3–0,4 mkg./cm.^{2} Das 24 stündige Altern des Bleches bei 250° C., ohne Kaltreckung, brachte keinen Abfall der Kerbzähigkeit mit sich.[11]

Der Stahl für die Herstellung der Stegbleche war ein mittelweicher S.M. Stahl (Lieferwerk: Jesenitze, Jugoslawien) mit C~0,18%, Mn~0,60%, Si~0,20%, S~0,038% und P~0,04%. Die Zugfestigkeit betrug σ_B~47,4 kg./mm.^{2}, die Dehnung λ_{10}~26,5% und die Güteziffer ~12.[10] Dieses Material neigte zur Schichten- und Lunkerbildung, auch das Blättern an den Rändern der Stahlbleche wurde beobachtet. Bei der Stahlabnahme wurden die Bleche mit sichtbaren Mängeln ausnahmslos ausgeschieden.

Als weiterer ungünstiger Umstand bei diesem Bauwerke kam in den Endfeldern noch das ungünstige Verhältniss von 1:21 zwischen der Trägerhöhe und der Spannweite dazu. Bei dem gemischten Verkehr auf der Brücke (Motorwägen und Pferdefuhrwerke) zeigt dieselbe auch unter kleineren Lasten eine gewisse Neigung zu verhältnissmässig starken Schwingungen.

Die Verkehrsdichte auf der Brücke war während ihres zwölfjährigen Bestehens ziemlich hoch. Während des Krieges gingen viele militärische Transporte, ohne irgendwelche Einschränkung, über dieselbe. In derselben Zeitspanne hat die Brücke auch einige sehr strenge Winter mit zahlreichen mehr oder weniger raschen Temperaturschwankungen ohne sichtbare Schäden anstandslos ausgehalten.

Die ungewöhnliche Stärke der Gurtlamellen, die Länge der Hauptträger und die sehr ungünstigen Werkstoffeigenschaften berechtigen wohl zu dem Schlusse, dass ohne systematische Durchführung der Wärmemassnahmen kaum mit einem Erfolg zu rechnen gewesen wäre.

Die verhältnissmässig niedrige Vorwärmungstemperatur (etwa 70–80° C.) der Gurtplatten bei der Schweissung von Kehlnähten, verbunden mit einigen anderen thermischen Massnahmen, dem pausenlosen Schweissen und der stärkeren örtlichen Vorwärmung der Anfangsstellen usw., genügten anscheinend um den Erfolg sicherzustellen und etwaige Rückschläge zu vermeiden.

Mreschnitzabrücke bei Gen. Stol (Abb. 2 und 3)

Dieses Bauwerk ist wegen seines günstigen Verhaltens während der Sprengung besonders beachtenswert. Bei der Sprengung des rechten Uferpfeilers im Frühjahr

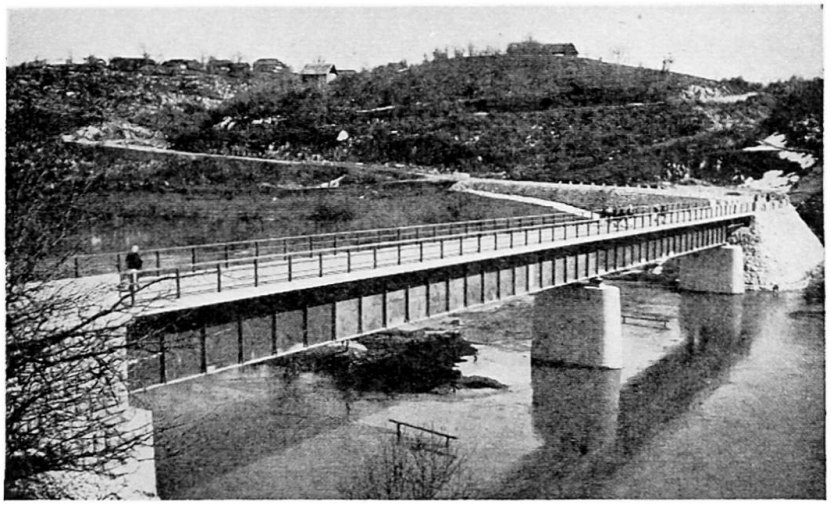

Abb. 2. Mreschnitzabrücke

1943 zeigte die Brücke trotz der schlagartigen Beanspruchung hervorragende plastische Eigenschaften. Die Stahlkonstruktion wurde weitgehend verformt. Bei der Besichtigung fand man keine Querrisse, weder in den Gurtungen, noch im Stegblech.

Die konstruktive Anordnung und die Werkstoffeigenschaften waren bei dieser Brücke, wenn auch nicht ganz zufriedenstellend, so doch wesentlich günstiger als bei der Savebrücke. Die Gesammtlänge der Brücke beträgt 8,0+40,0+45,0=93,0 m. Die Hauptträger sind als zwei je 86,0 m. lange, über zwei Oeffnungen durchlaufende Träger, von konstanter Höhe (2,54 m.) ausgebildet. Die Abmessungen der Gurtlamellen betragen 400×52 und 400×70 mm. in der grösseren und 400×34 und

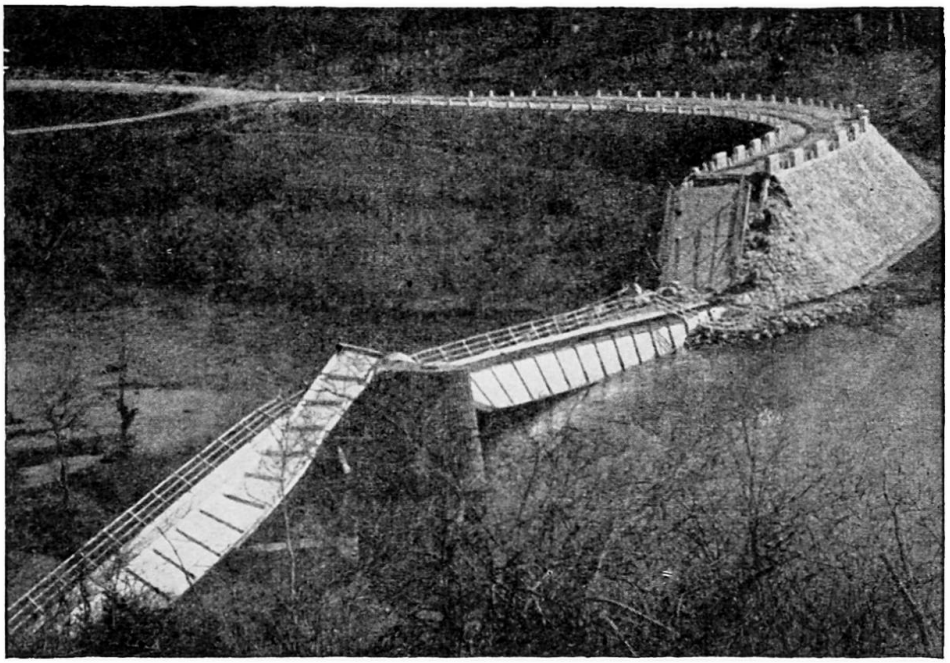

Abb. 3. Mreschnitzabrücke nach der Sprengung

400 × 70 mm. in der kleineren Oeffnung. Die konstante Stärke des Stegbleches beträgt 13 mm. Die kreuzweise bewehrte Fahrbahnplatte aus Eisenbeton dient gleich zeitig als Windverband. Die Hauptträger und die Querrahmen wurden aus St. 37 in ausschliesslich geschweisster Bauweise hergestellt. Das Gesammtgewicht der geschweissten Stahlkonstruktion betrug ~128.000 kg., davon die Hauptträger ~94.000 kg.

Die Hauptträger wurden unter systematischer Anwendung der Wärmemassnahmen geschweisst. Die übrigen Konstruktionsteile wurden nur dann vorgewärmt, wenn die Temperatur unter + 15° C. sank.

Der Stahl für die Herstellung der Gurtungen (Lieferwerk: Witkowitz, Tschechoslowakei) war ein sehr weicher, niedrig gekohlter Stahl in der S.M. Güte[11] mit C-Gehalt~0,08 %, Mn~0,43 %, Cu~0,27 %, P~0,025 % und S~0,024 %. Die metallographische Beschaffenheit war einwandfrei.

Die Zugfestigkeit betrug σ_B ~35,8 kg./mm.², die Bruchdehnung λ_{10}~27,2 % und die Güteziffer~9,7. Im Dauerversuch betrug die Ursprungsfestigkeit der ungelochten Stäbe in Anlieferungszustand σ_u~21,6 kg./mm.² und der geschw. Stäbe (ohne Vorwärmung) σ_u~19,8 kg./mm.²

Schlagbiegerversuche mit eingekerbten Stäben zeigten, dass der untersuchte Stahl sehr temperaturempfindlich war. Die Kerbzähigkeit längs und quer betrug bei +18° C. ~25,3; 8,7 und bei −16° C. ~2,3; 3,7 mkg./cm.² Auffallend ist der grosse Unterschied zwischen den längs und quer zur Walzrichtung entnommenen Versuchs stäben, und wie auch der grosse Abfall der Kerbzähigkeitswerte bei tiefen Temperaturen.

Der Stahl für die Stegbleche (Lieferwerk: Jesenitze, Jugoslawien) war ein weicher S.M. Stahl C~0,10 %, Mn~0,41 %, Cu~0,24 %, P~0,04 % und S~0,015 %. Die metallographische Beschaffenheit war einwandfrei.

Die Zugfestigkeit betrug σ_B~38,9 kg./mm.², die Streckgrenze σ_S~27,7 kg./mm.², die Bruchdehnung λ_{10}~26,1 % und die Güteziffer ~10,1. Die Ursprungsfestigkeit betrug für ungelochte Stäbe σ_u~26 und für gelochte σ_u~17 kg./mm.²

Die Kerbzähigkeit im Anlieferungszustand betrug längs und quer bei +20° C. ~20,8; 10,9 und bei −16° C. ~17,9; 9,7 mkg./cm.² Die um 3 % kaltgereckten und bei 250° C. während 24 Stunden gealterten Stäbe erreichten bei +20° C. ~17,9; 9,7 und bei −16° C. ~3,1; 2,6 mkg./cm.² Im Anlieferungszustand ist dieser Stahl temperaturunempfindlich und bei normalen Temperaturen auch alterungsunempfindlich.

Laut Gutachten Prof. Dr. Roš[11] ist dieser Stahl für geschweisste vollwandige Brückentragwerke grösserer Spannweite gut verwendbar, während der erste, für die Ausführung der Gurtungen bestimmte Stahl, für Bauten die dem Frost besonders ausgesetzt sind, nicht zu empfehlen ist.

Um unliebsame Zeitverluste und Streitigkeiten mit dem Lieferwerk zu vermeiden, entschloss man sich seinerzeit dennoch zur Verwendung dieses Materials. Während des dreijährigen Bestehens der Brücke zeigten sich keine Mängel. Die Brücke hielt vor der Sprengung anstandslos zwei strenge Winter durch.

Bei beiden beschriebenen Bauwerken konnten die gewählten Arbeitsmethoden, ohne erhebliche Mehrkosten, die Werkstoffmängel üblicher Herstellungsart mit Erfolg überbrücken.

Die praktisch erzielten günstigen Ergebnisse rechtfertigen wohl eine weitere Anwendung bezw. Entwicklung der Vorwärmungs-und anderen thermischen Massnahmen bei der Schweissung von vollwandigen geschweissten stählernen Brücken. Unentbehrlich sind diese Massnahmen bei der Verwendung höhergekohlter Stähle und stärkerer Gurtplatten.

LITERATURVERZEICHNIS

(1) KLÖPPEL, K. *Schweisstechnik im Stahlbau*, Stahlbaukalender 1940/42.
(2) SCHNEIDER, W. J. "Einrichtungen zum Vorwärmen und Glühen," *Elektroschweissung*, **11**, 180, 1940.
(3) KOMMERELL, O. *Erläut. Hochbau* (1940), *Eisenbrücken* (1942).
(4) WERNER, O. "Ueber d. Z. z. Stahleigenschaften u. Schweissbarkeit v. Stählen," *Elektroschweissung*, **10**, 61, 1939.
(5) ROŠ, M. "Zwei neue beacht. Brücken Jugoslawiens," *Schweiz. Bauzeitung*, **115**, (22) u. (23), 1940.
(6) EREGA, J. "Strassenbrücke über die Save, Zagreb," *Grad'. Vjesnik*, **9**, (6), (7), 1940.
(7) EREGA, J. "Geschw. Strassenbrücke ü. d. Save, Zagreb," *Bauingenieur*, **22**, 1, 1941.
(8) *EREGA, J. Praktische Durchführung d. Vorwärmungsmassnahmen, Vortrag geh. 1/III.1941, Weimar Stz. Deutsch. Stahlbauverband.
(9) *ŠAHNAZAROV, A. Tech. Fak. Zagreb, Berichte Savebrücke, 7/XII.1937, 14/I.1938, 25/V.1939.
(10) *EREGA, J. Savebrücke Zagreb, Stahlabnahmeprotokolle.
(11) *ROŠ, M. EMPA—Berichte Auftr. No. 5938 (1938), No. 11143 (1939), No. 3884 (1940) Savebrücke und No. 6704 (1938), No. 9470 (1939) Mreschnitzabrücke.

Zusammenfassung

Nach einer allgemeinen Uebersicht wird die praktische Durchführung der Vorwärmungsarbeiten an den wichtigsten Verbindungen der geschweissten Vollwandbalken im Brückenbau näher beschrieben. Die rechnerische Abschätzung der durch die Vorwärmungsmassnahmen hervorgerufenen Beanspruchungen kann auf Grund der angegebenen einfachen Ableitungen durchgeführt werden.

Nach der Erörterung der Kostenfrage zur Durchführung der Wärmemassnahmen werden einige günstige, praktische Erfahrungen im Betriebe, mit zwei auf solche Art geschweissten Brücken näher beschrieben.

Summary

After a general survey, a more detailed description is given of the practical application of preliminary heating to the more important connections of the welded solid-web beams in bridge-building. The mathematical estimate of the stressing caused by the heating operations can be based on the simple deductions that are given.

After discussing the question of the cost of carrying out the preheating, full descriptions are given of some successful practical experience in actual work on bridges welded in such a manner.

Résumé

Après une vue d'ensemble, l'auteur décrit d'une manière détaillée les conditions pratiques d'exécution des opérations de chauffage préalable des poutres pleines soudées des ponts métalliques. Le calcul approché des contraintes mises en jeu par ce chauffage préalable peut être effectué sur la base d'équations simples, qui sont indiquées.

Après une étude de la question des prix de revient, l'auteur expose d'une manière plus détaillée quelques expériences pratiques favorables concernant deux ponts soudés dans ces conditions.

* Die Quellen unter (8), (9), (10), (11) nicht allgemein zugänglich.