Zeitschrift: IABSE reports of the working commissions = Rapports des commissions de travail AIPC = IVBH Berichte der Arbeitskommissionen

Band: 21 (1975)

Artikel: Einfluss der Schweissverformungen und Schweisseigenspannungen auf die Stabilität von versteiften dünnwandigen Druckgurten von Kastenträgern

Autor: Hänsch, H.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-18784

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. 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. Siehe Rechtliche Hinweise.

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. Voir Informations légales.

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. See Legal notice.

Download PDF: 24.05.2025

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

Einfluss der Schweissverformungen und Schweisseigenspannungen auf die Stabilität von versteiften dünnwandigen Druckgurten von Kastenträgern

Influence of Welding's Deformation and Residual Stresses on the Stability of Thin Stiffened Compression Flanges of Box-Girders

Influence des déformations et des contraintes résiduelles de soudure sur la stabilité des membrures comprimées de poutres en caisson raidies

H. HÄNSCH
Dozent Dr.-Ing.
Ingenieurhochschule Cottbus
Cottbus, DDR

1. Einleitung

Eine Serie von Brückeneinstürzen in den letzten Jahren war Anlaß, wiederum die Wirkungen der einer Schweißkonstruktion anhaftenden Schrumpfverformungen und -spannungen ins Blickfeld zu rücken. Es drängen sich unwillkürlich Parallelen zu den Schäden an Brücken und Schiffen vor 30-40 Jahren auf, als die ungünstige Wirkung von Schweißeigenspannungen auf das Sprödbruchverhalten einer Schweißkonstruktion "entdeckt" wurde. Seitdem beschäftigte man sich intensiv mit den im Nahtbereich auftretenden hohen Zugeigenspannungen, die die Größe der Fließgrenze erreichen. Die diesen Zugeigenspannungen das Gleichgewicht haltenden Druckeigenspannungen wurden erst in den letzten Jahren interessant, als auch bei druckbeanspruchten Baugliedern die Sicherheitsreserven im Zuge der allgemeinen Erhöhung der zulässigen Spannungen (Knickstäbe) bzw. mit der Einführung des Kastenträgers (Druckgurte) abgebaut wurden. Obwohl bei stabförmigen Bauelementen (Druckstäben) keine schweren Unfälle infolge falscher Einschätzung des Einflusses von Druckeigenspannungen auf die Traglast bekannt geworden sind, hat man in das Berechnungsverfahren schon bald nach Vorliegen ausreichender Erkenntnisse auch die graduelle Wirkung der Eigenspannungen einfließen lassen. Schon 1957 hat Bornscheuer [1] auf den Einfluß von Druckeigenspannungen auf die Beulstabilität von dünnwandigen Flächentragwerken aufmerksam gemacht, aber erst in jüngster Zeit sind Untersuchungen dazu unter dem Aspekt von Schadensfällen angelaufen. Auch in [2] wird schon darauf hingewiesen, daß bei dünnen Blechen (<10 mm) die beim Schweißen unvermeidlichen Verwerfungen (Beulen) zur Verringerung der Tragfähigkeit infolge Ausschaltung von Querschnittsteilen von der Tragwirkung führen können.

Mit Rippen und Steifen versehene Platten und Scheiben weisen nach dem Schweißen technologisch bedingte Abweichungen vom projektierten Zustand (Imperfektionen) auf, deren Einfluß auf die Tragsicherheit und Erhaltung der Stabilität qualitativ und quantitativ zu untersuchen ist. Die sich als Folge des Schrumpfens des Nahtbereiches einstellenden Formabweichungen von der geplanten idealen Form des Flächenelementes (Geometrie-Imperfektionen) gehen als Vorverformungen in das Bauelement ein. Außerdem muß den nach dem Schweißen in der Konstruktion verbliebenen Eigenspannungen (Restspannungen = residual stresses), die als Struktur-Imperfektionen zu verstehen sind und als Vorspannungen in das Bauteil eingehen, nachgegangen werden.

Größe und Richtung sowohl der Form- als auch der Strukturveränderungen während des Schweißens sind zeitabhängig. Der Zustand während des Schweißens ist für den Fertigungsprozeß interessant. Für die Erfassung der Schweiß-Imperfektionen bei der Bemessung sind jedoch nur die nach der Abkühlung verbliebenen Spannungen und Verformungen von Bedeutung. In dem verarbeiteten Material schon vor dem Schweißen vorhandene Struktur-Imperfektionen als Walz-, Brennschnitt- und sonstige Wärmebehandlungs-Eigenspannungen und Eigenspannungen aus anderen Bearbeitungsprozessen werden in der Regel vernachlässigt. Diese werden auch z.T. durch den Schweißprozeß kompensiert. Hingegen sind Eigenspannungen vom nachträglichen Richten von größerer Bedeutung.

2. Schweißverformungen

Für die hier interessierende Fragestellung sind nur solche Verformungen zu betrachten, die sich infolge außermittiger Schrumpfwirkungen ergeben, wenn also die Wirkungslinien der resultierenden Schrumpfkräfte nicht in der Mittelfläche (geometrischer Ort der Schwerachsen) des Flächentragwerkes liegen. Außermittige Schrumpfkräfte haben Schrumpfmomente zur Folge, die zu Krümmungen und Beulen (Verwerfungen) führen. Als Ursache für diese Vorverformungen kommen in Betracht:

- Außermittige Querschrumpfung (quer zur Naht) verursacht Winkeländerung der die Schweißnaht einschließenden Schweißteilflanken, so daß ebene Flächen an der Schweißnaht einen Knick erhalten (Abb. 1).
- Außermittige Längsschrumpfung (längs zur Naht) verursacht eine kontinuierliche Krümmung der Mittelfläche des Elementes (Abb. 4).

An einachsig exzentrisch ausgesteiften ebenen Blechen entstehen infolge außermittiger Querschrumpfung der Verbindungsnähte (z.B. Doppelkehlnähte) zwischen Steifen und Blech Winkeländerungen, die Vorbeulen zwischen den Steifen erzeugen (Abb. 1) mit einer Durchbiegung in der Mitte von

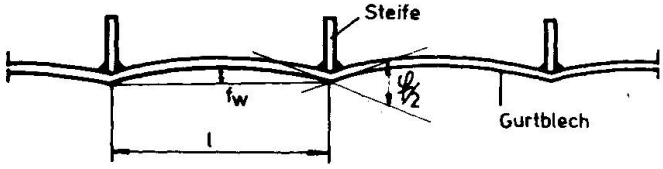


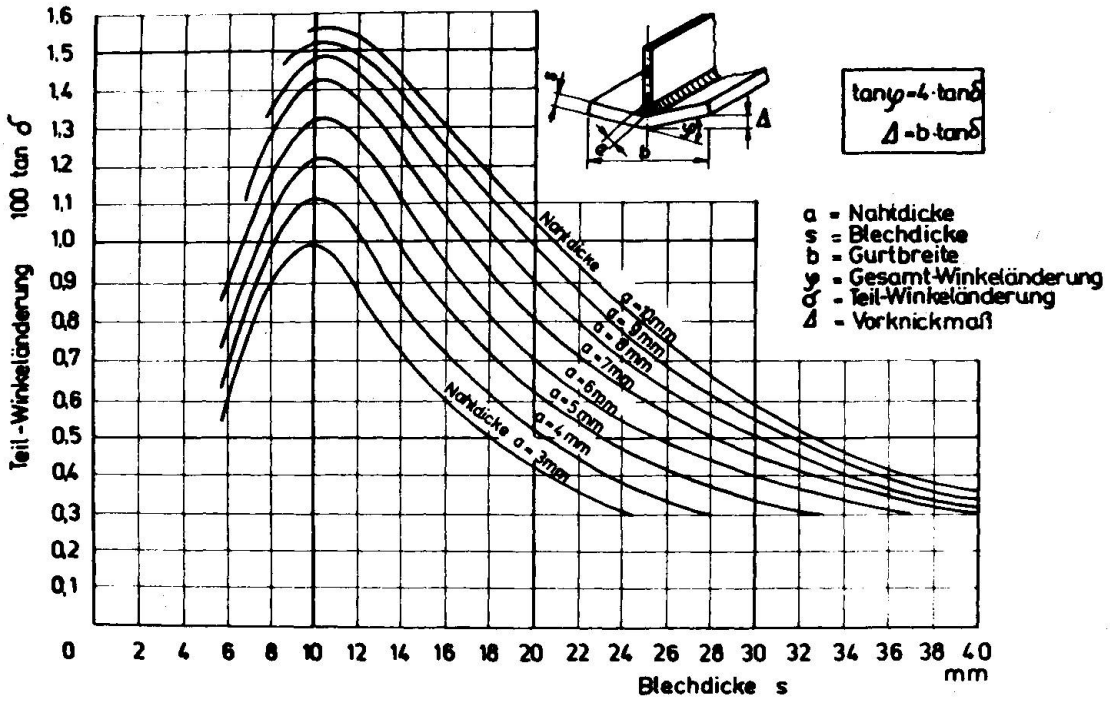
Abb. 1: Vorbeulen infolge Winkeländerung von Doppelkehlnähten

$$f_W = \frac{\tan\varphi \cdot l}{16} = \frac{\tan\delta \cdot l}{4} \qquad (1)$$

Dabei kann $\tan\varphi$ oder $\tan\delta$ als Maß für die Winkeländerung bei freier Schrumpfung (freie Blechkanten) für Doppelkehlnähte aus Abb. 2 entnommen werden. Für eine Blechdicke s = 10 mm und Nahtdicke a = 4 mm würde sich mit $100 \cdot \tan\delta = 1{,}1$ nach Abb. 2 eine Vorbeule ergeben von

$$f_W = \frac{1{,}1 \cdot l}{400} = \frac{l}{360},$$

Abb. 2: Mittelwerte der Winkeländerung (Vorknickmaße) von Doppelkehlnähten bei freier Schrumpfung in Abhängigkeit von Naht- und Blechdicke für horizontale Einlagenschweißung



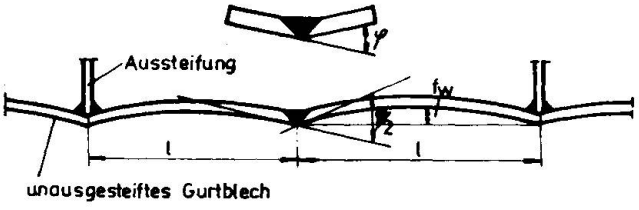


Abb. 3: Vorbeulen infolge Winkeländerung von Stumpfnähten

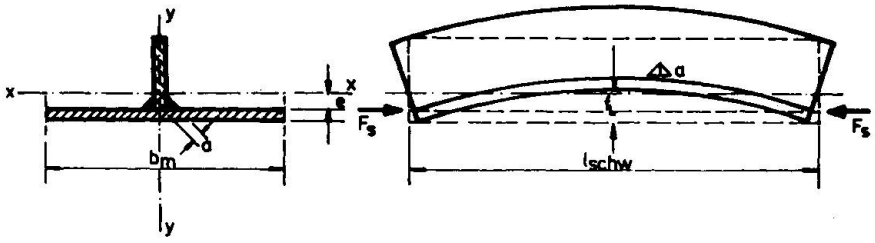


Abb. 4: Krümmung infolge außermittiger Längsschrumpfung

ein Wert, der mit gemessenen Vorbeulen zwischen Steifen von Hohlkastenträgergurten von 1/300 recht gut übereinstimmt [3]. Analog werden Vorbeulen von Stumpfnähten ermittelt (Abb. 3).

Krümmungen in Steifenlängsrichtung ergeben sich an exzentrisch ausgesteiften ebenen Blechen infolge der außermittigen Wirkung der Längsschrumpfung der Anschlußnähte der Steifen entsprechend Abb. 4. Je nach Lage der Steifen und Randbedingungen des Schweißteiles erhalten die ausgesteiften Gurtfelder Vorbeulen, für die als Anhaltswert (Größtwert) die Durchbiegung in der Mitte des Ersatzstabes bei

freien Längs- und Querrändern

$$f_L = p_s \, A_{schw} \, e \, \frac{l^2_{schw}}{8 \, EJ_x} \qquad (2)$$

dienen kann.

Hierin bedeuten

$p_s = \frac{F_s}{A_{schw}}$	Längsschrumpfkraft je mm^2 Schweißnahtfläche (spezifische Längsschrumpfkraft)	in kp/mm^2
A_{schw}	Schweißnahtquerschnittsfläche	in mm^2
e	Abstand der Schweißnaht vom Schwerpunkt des Querschnitts	in cm
l_{schw}	Schweißnahtlänge	in cm
E	Elastizitätsmodul	in kp/cm^2
J_x	Trägheitsmoment bezogen auf maßgebende Biegeachse	in cm^4

Nach Messungen an geschweißten Brückenträgern haben sich spezifische Längsschrumpfkräfte für einlagige Kehlnähte bei Elektrodenhandschweißung ergeben von

$$p_s = 900 \ldots 1000 \; kp/mm^2.$$

Berechnungen auf der Grundlage der Lichtbogenleistung und der wärme-physikalischen Eigenschaften niedrig gekohlter Baustähle führen für eine einlagige V-Stumpfnaht (Elektrodenhandschweißung) zu einer spezifischen Längsschrumpfkraft von

$$p_s = 1080 \; kp/mm^2.$$

Bei Hochleistungsschweißverfahren weichen die Schrumpfkräfte nach oben und unten davon ab. Mehrlagen- und unterbrochene Schweißungen haben geringere Schrumpfkräfte.

Der in Abb. 4 als freies Element wiedergegebene, aus dem Druckgurt herausgetrennte Ersatzstab muß natürlich mit seinen Randbedingungen mit der Gesamtkonstruktion des Kastenträgers verträglich gemacht werden. Aber nicht nur das. Hier sind die technologischen Bedingungen von entscheidendem Einfluß. Die für den Endzustand nach Abschluß des Fertigungs- und Montageprozesses zur Einschätzung der Tragsicherheit des Druckgurtes bzw. des ganzen Kastenträgers interessierende Vorverformung ist nämlich das Ergebnis der Überlagerung einer Vielzahl von Verformungs-Zwischenzuständen der einzelnen Fertigungs- und Montagestufen. Mit der Wahl der Schweiß- und Zusammenbaufolge beeinflußt der Technologe die Qualität des Ergebnisses "Vorverformung" ganz erheblich. Es sollte daher die Kapazität, die beim nachträglichen Richten aufgewendet werden muß, in den Vorbereitungsprozeß zur Erreichung einer minimalen Vorverformung gesteckt werden; der Gewinn ist dabei noch eine spannungsärmere Konstruktion.

3. Eigenspannungen

Die Schrumpfkräfte der Verbindungsnähte zwischen den Einzel-

teilen von ausgesteiften Platten und Scheiben werden auf den zugehörigen Querschnitt so verteilt, daß den Zugeigenspannungen in den Nahtzonen Druckeigenspannungen des übrigen Querschnittes entgegenstehen. Nach [4] ergibt sich die Größe der Zone A_{200}, die während des Schweißens 200° C erreicht hat und nach dem Abkühlen mit einer Zugeigenspannung in Höhe der Streckgrenze vorgespannt ist, aus Versuchen zu

$$A_{200} \approx 44\ A_{schw}$$

Aus Gleichgewichtsgründen muß sein:

$$A_{200}\ \sigma_s = \int \sigma_{ed}\ dA_{ed}, \qquad (3)$$

$$\text{oder } 44\ A_{schw}\ \sigma_s = \int \sigma_{ed}\ dA_{ed}. \qquad (3a)$$

Die für gedrückte Bauglieder wichtigen Druckeigenspannungen σ_{ed} sind, wie aus Gl. (3) ersichtlich, vom Verhältnis des Schweißnahtquerschnittes A_{schw} zum zugehörigen Querschnittsteil A_{ed} mit Druckeigenspannungen abhängig. Dabei ist die Vernachlässigung der Querschnittsfläche der Zugzone in A_{ed} bei im Verhältnis zum Nahtquerschnitt großem Querschnitt zulässig, was bei ausgesteiften Druckgurten von Kastenträgerbrücken der Fall ist. Weiter kann näherungsweise angenommen werden, daß die Druckeigenspannungen auf den zugehörigen Anteil der Querschnittsfläche allseitig der Naht gleichmäßig verteilt sind. Für den ausgesteiften Druckgurt nach Abb. 5 werden dann mit

$$A_{ed} = b_m\ t_{Bl} + h_{St}\ t_{St}$$

die Druckeigenspannungen

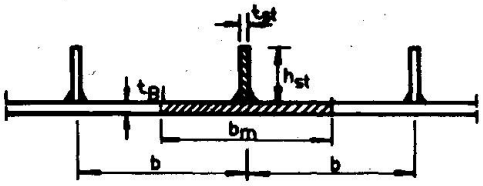


Abb. 5: Ausgesteifter Druckgurt eines Kastenträgers

$$\sigma_{ed} = \frac{p_s\ A_{schw}}{A_{ed}} = \frac{p_s\ A_{schw}}{b_m\ t_{Bl} + h_{St}\ t_{St}} \qquad (4)$$

$$\text{oder} \quad \sigma_{ed} = \frac{44\ \sigma_s\ A_{schw}}{A_{ed}} = \frac{44\ \sigma_s\ A_{schw}}{b_m\ t_{Bl} + h_{St}\ t_{St}} \qquad (4a)$$

4. Einfluß der Schweiß-Imperfektionen auf die Beullast

Auf den Fall der Instabilität zylindrischer Silozellen wurde schon hingewiesen. Die beim Ablassen des Füllgutes an drei Stellen zwischen den Rundschweißnähten an 6 bis 8 mm dicken Blechwandungen gleichzeitig aufgetretenen Beulen werden auf die Wirkung der quer zu den Lastspannungen gerichteten Tangential-Druckeigenspannungen zurückgeführt. Aus den Untersuchungen geht hervor, daß die Beulstabilität theoretisch ausreichend war und sogar gegenüber der unteren aus Versuchen abgeleiteten Grenze der Traglastbeulspannung eine Sicherheit von $\nu_B = 1{,}3$ bestand. Auch Vorverformungen werden als beulfördernd nicht in Betracht gezogen, da der Zylindermantel kurz vorher auf Formabweichungen geprüft worden war.

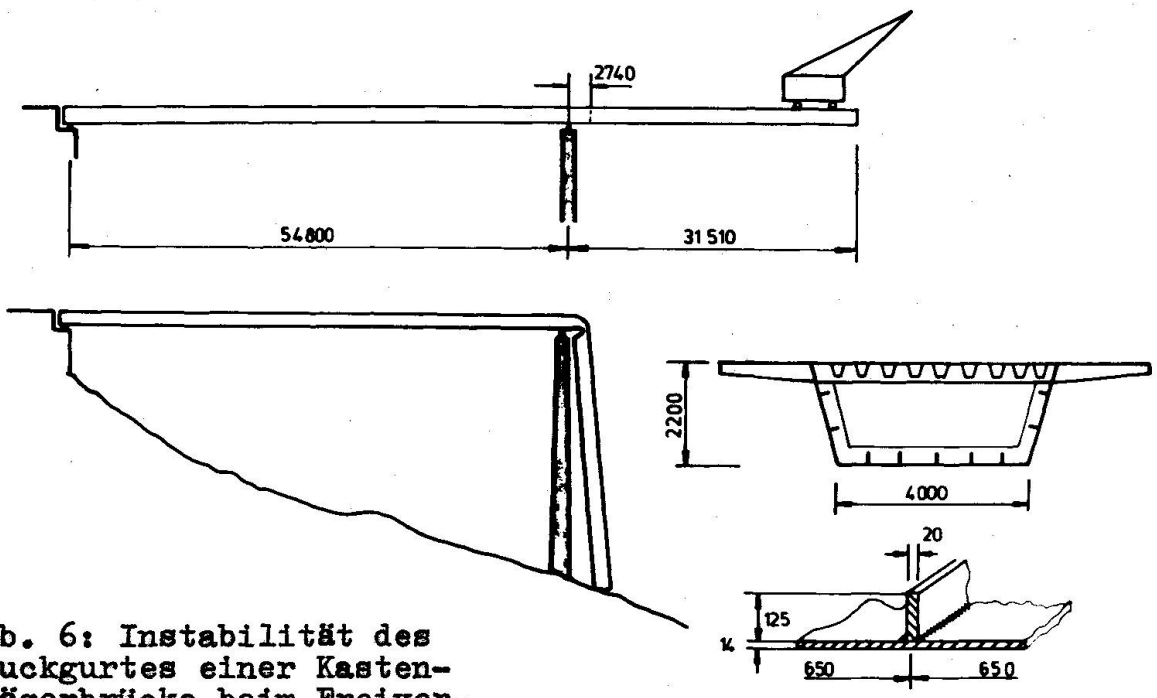


Abb. 6: Instabilität des Druckgurtes einer Kastenträgerbrücke beim Freivorbau

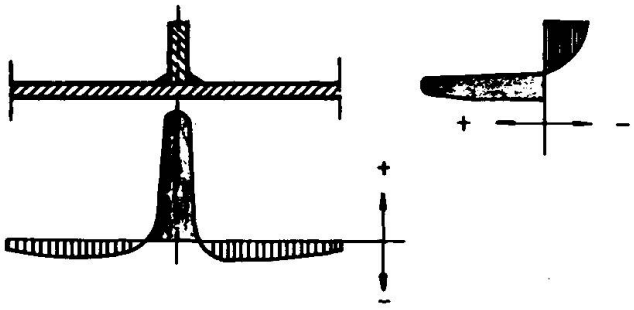


Abb. 7: Eigenspannungsverteilung am Druckgurt mit Flachstahlsteifen

Wertet man den letzten Schadensfall (Abb. 6) in der Serie der Brückeneinstürze, bei denen der Druckgurt durch Instabilität versagte, mit der Gl. (4) aus, so erhält man eine mittlere Druckeigenspannung von

$$\sigma_{ed} \approx 250 \text{ kp/cm}^2,$$

d.s. 7 % der Fließgrenze. Die Verteilung der Eigenspannungen kann entsprechend Abb. 7 angenommen werden. Zu diesen Struktur-Imperfektionen kommt noch eine Vorverformung (Geometrie-Imperfektion) als Beule nach dem Kasteninneren infolge der Schrumpfvorgänge beim Schweißen des Kastengurtes und anderer Fertigungs- und Montageungenauigkeiten hinzu. Der aus St 52 bestehende untere Druckgurt versagte bei einer Beanspruchung von 2400 kp/cm^2, obwohl die auf der Grundlage der linearen Beultheorie des ebenen Bleches ermittelte Beulspannung 3040 kp/cm^2 betrug. Aber schon bei einer Vorverformung des Gurtes aus seiner Ebene von 6 mm verringert sich die Beulspannung auf ca. 2700 kp/cm^2, wenn man den Gurt als freien Druckstab auffaßt. Es bedürfte also bei Beachtung der Eigenspannungen als Vprspannungen nur noch eines kleinsten Spannungszuwachses, möglicherweise durch die am Tage des Einsturzes außergewöhnlich starke Sonneneinstrahlung auf die stählerne Fahrbahnplatte, um die verbliebene Sicherheitszone von

$$2700-2400-250 = 50 \text{ kp/cm}^2$$

abzubauen, wenn man eine Vorverformung von 6 mm als real ansieht. Dieser Wert entspricht 1/450 des Abstandes der Querrahmen und steht damit völlig im Einklang mit gemessenen Verformungen von 1/300 ... 1/600 [3] . Es scheint also offensichtlich kaum eine überkritische Reserve gegeben zu haben, höchstens in der Größenordnung des hier nicht erfaßten Einflusses der Stützung der Längsränder des breiten Gurt-feldes durch die Stege. (Die elastischen Einspannbedingungen an den Querrahmen sind näherungsweise berücksichtigt.)

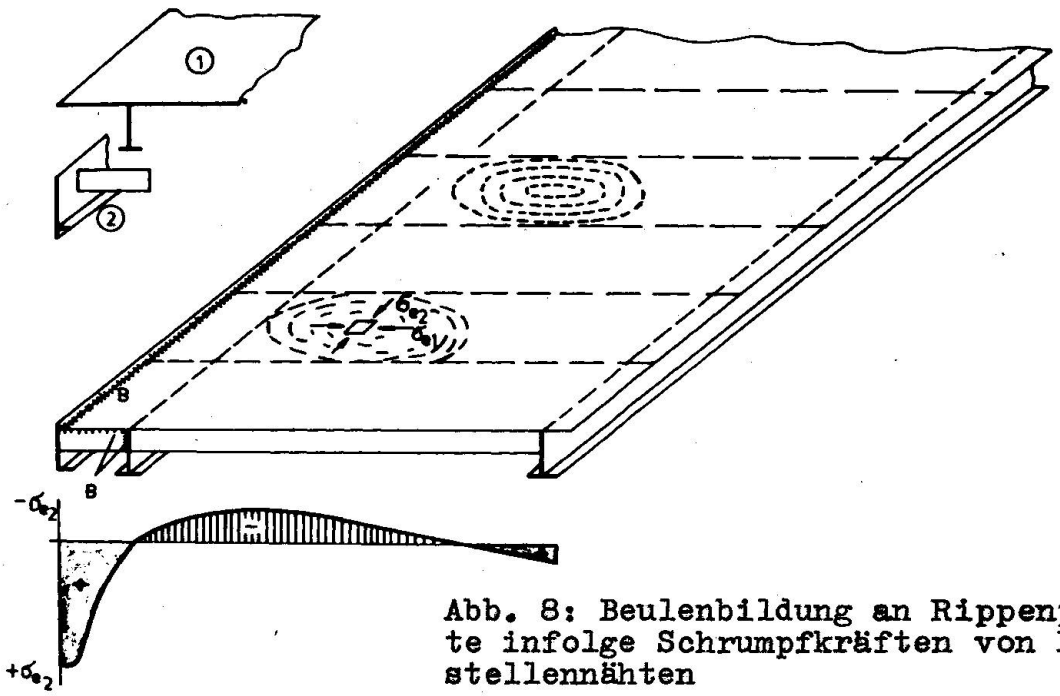


Abb. 8: Beulenbildung an Rippenplatte infolge Schrumpfkräften von Baustellennähten

Schon ohne Einwirkung von Lastdruckspannungen können dünne Bleche infolge der Wirkung von Druckeigenspannungen ausbeulen. Ein praktisches Beispiel dafür gibt ein mit Flachstahlrippen versteiftes ebenes Bleches der Fußwegplatte einer Brücke (Abb. 8), bei dem nach dem Zusammenschweißen der Teile 1 und 2 mit den Baustellennähten "B" Beulen aufgetreten sind, die auf die außermittige Wirkung von Schrumpfkräften infolge der Quernähte der Rippenanschlüsse und vor allem infolge der Längsnähte des Gesimsanschlusses hindeuten. Zu den schon durch das Schweißen der Querrippenanschlüsse in der Werkstatt eingetragenen Druckeigenspannungen σ_{e1} quer zur Plattenlängsrichtung kommen nach dem Schweißen der Baustellennähte Druckeigenspannungen σ_{e2} senkrecht dazu hinzu. Zusammen mit den Geometrie-Imperfektionen (Vorbeulen) infolge Winkeländerung der Rippenanschlüsse bewirkten die zweiachsigen Druckeigenspannungen ein Erreichen der kritischen Beulbeanspruchung, ohne daß eine äußere Last eingetragen wurde.

5. Schlußfolgerungen

Die bestehenden Festlegungen über die Berechnung von druckbeanspruchten geschweißten Kastenträgergurten sind zu überprüfen. Geometrie- und Strukturimperfektionen dürfen bei der Berechnung und Gestaltung nicht außer Acht gelassen werden. Für die Berücksichtigung von Eigenspannungen und Vorverformungen beim Stabilitätsnachweis genügen lineare Theorien nicht mehr. Es müssen Berechnungsgrundlagen geschaffen werden, die den Einfluß der konstruktiven Gestaltung und der technologischen Ausführung differenziert erfassen. Die Forderungen des Konstrukteurs an den Technologen, eine möglichst verzugs- und eigenspannungsfreie Konstruktion zu schaffen, müssen mit den Zielen des Technologen, die Konstruktion mit vertretbarem wirtschaftlichem Aufwand funktionsgerecht herzustellen, in Einklang gebracht werden. Mehrlagenschweißungen z.B. verringern die Schrumpfwirkungen, erfordern aber höheren technologischen Aufwand. Richtarbeiten vermindern Vorverformungen und machen damit die Konstruktion gegenüber Stabilitätsfällen sicherer, erzeugen aber neue innere Spannungen, die in ihrer Wirkung

auf die Tragsicherheit noch schwerer erfaßbar sind als Schweißeigenspannungen; und vor allem: Richten bedeutet hohen technologischen Aufwand, meist manueller Art. Es ist deshalb notwendig, die zu erwartenden Schweißverformungen und Eigenspannungen vorauszubestimmen, durch optimale Technologien zu minimieren, die aber praktisch unvermeidbaren Imperfektionen in der Konstruktion zu "verkraften" und ohne Richtarbeiten auszukommen. Die künftigen Berechnungs- und Bauvorschriften sollten dieser Zielstellung Rechnung tragen.

Aufgabe dieses Beitrages sollte es sein, Vorschläge zur Vorausbestimmung von Eigenspannungen und Vorverformungen zu unterbreiten, die für die Tragsicherheit von Druckgurten in Kastenträgern von Bedeutung sind. Dabei wurde bewußt auf die Fragestellung der Praxis orientiert, um ingenieursmäßige Lösungen des Problems anzuregen.

Literaturverzeichnis:

[1] Bornscheuer, F.-W.: Durch Schweißeigenspannungen an zylinderförmigen Konstruktionen ausgelöste Beulerscheinungen. Schweißen und Schneiden 9 (1957), H. 11, S. 492-494

[2] Hänsch, H. und Krebs, J.: Eigenspannungen und Schrumpfungen in Schweißkonstruktionen, VEB Verlag Technik, Berlin 1961

[3] Leonhardt, F. und Hommel, D.: The necessity of quantifying imperfections of all structural members for stability of box girders (Über die Notwendigkeit der quantitativen Erfassung von Imperfektionen aller stabilisierenden Konstruktionselemente von Hohlkastenträgern). Bericht Nr. 2 der Internationalen Konferenz über stählerne Hohlkastenträgerbrücken. London 1973

[4] Buttenschön, K.: Beulen von dünnwandigen Kastenträgern aufgrund von Schweißeigenspannungen. Schweißen und Schneiden 25 (1972), H. 6, S. 217

ZUSAMMENFASSUNG

Das ausgesteifte ebene Blech des Druckgurtes eines Kastenträgers weist von der Fertigung und Montage her Imperfektionen auf, die durch den thermischen Prozess beim Schweissen bedingt sind und sich hauptsächlich als Eigenspannungen und Formabweichungen darstellen. In dem Beitrag werden Vorschläge zur Vorausbestimmung dieser zu erwartenden Vorspannungen und Vorverformungen und in Auswertung von Schadensfällen notwendigen Berücksichtigung dieser Einflüsse bei Entwurf und Ausführung von Druckgurten unterbreitet.

SUMMARY

The stiffened plane plate of the compression flanges of a box-girder shows failures during fabrication and erection, which are caused by the welding's heat, and which cause residual stresses and deformation. Suggestions are made for determining beforehand these possible tensions and deformations; the study of accidents allows also to improve the fabrication and erection of compression flanges.

RESUME

Les tôles de membrure des poutres en caisson raidies présentent des imperfections dues au retrait des soudures lors de la fabrication et du montage; ces imperfections se manifestent sous forme de contraintes résiduelles et de déformations. L'auteur montre comment estimer à l'avance ces contraintes et flèches initiales et comment en tenir compte pour l'étude et l'exécution, à la lumière de l'analyse d'accidents.