Zeitschrift: Schweizerische Bauzeitung

Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine

Band: 71 (1953)

Heft: 46

Artikel: Torsion von Kastenträgern mit elastisch verformbarem symmetrischem Querschnitt

Autor: Müller, Peter

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-60661

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: 17.07.2025

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

71. Jahrgang

Nachdruck von Bild oder Text nur mit Zustimmung der Redaktion und nur mit genauer Quellenangabe gestattet
Der S. I. A. ist für den Inhalt des redaktionellen Teils seiner Vereinsorgane nicht verantwortlich

Nummer 46

Torsion von Kastenträgern mit elastisch verformbarem symmetrischem Querschnitt

Von Dipl. Ing. PETER MÜLLER, Basel

DK 624.09

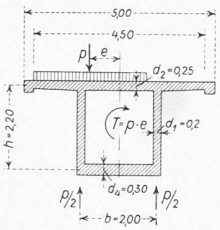

Bild 1a. Strassenbrücke mit Kastenquerschnitt

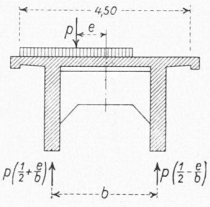

Bild 1b. Strassenbrücke mit zwei Hauptträgern

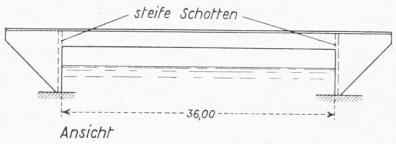

Bild 1c. Ansicht der Brücke

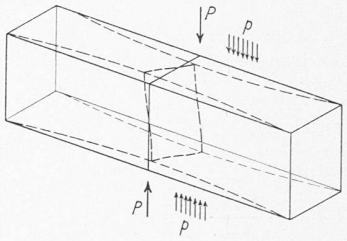

Bild 2. Verzerrungen des Kastens bei Belastung durch Kräftepaare

Beim Entwurf einer vorgespannten Rahmenbrücke (über den Kölaälv in Mittelschweden) mit der nutzbaren Breite von 4,5 m zeigte es sich, dass ein geschlossener Kasten das wirtschaftlichste Profil des Hauptträgers war (Bild 1a), weil bei einseitiger Stellung der Verkehrslasten ein geschlossener Kasten mit Hilfe des Schubflusses die Torsion aufnehmen kann und der Hauptträger nur auf die einfache Verkehrslast dimensioniert werden muss. Bei zwei getrennten Hauptträgern nach Bild 1b müsste jeder auf mehr als die halbe Verkehrslast berechnet werden.

Professor Dr. *F. Stüssi* hat in Band 11 der IVBH-Abhandlungen (S. 375) in einem Aufsatz über den dünnwandigen schlanken Stahlstab mit Kastenquerschnitt die Berechnung solcher Kastenquerschnitte erläutert unter der Voraussetzung allerdings, dass der Querschnitt undeformierbar sei, d. h. dass genügend steife Querschotten eingebaut werden, die dafür sorgen, dass die Querschnittsform erhalten bleibt. Konstruktiv einfach und damit wirtschaftlich überlegen wird aber eine solche Brücke erst dann, wenn wir die Querträger zwischen den Auflagern weglassen können (Bild 1 c) und bloss an den Auflagern versteifende Schotten einbauen. Dann stellt sich aber die Frage, wie steif der Kasten sein müsse, um eine Kräfteverteilung entsprechend der Schubflusstheorie zu erzwingen.

In diesem Aufsatz soll eine vereinfachte Theorie eines solchen schlanken symmetrischen Kastenträgers mit elastisch verformbarem Querschnitt abgeleitet werden.

Um Verwechslungen auszuschliessen, sei zunächst auf die Unterschiede der beiden Theorien hingewiesen. Ist der Querschnitt undeformierbar, so entstehen die Kantenspannungen allein aus der Deformation der Scheiben infolge der Querkräfte (Schubfluss). Lässt sich dagegen der Kasten elastisch verzerren, so entstehen ausserdem noch Spannungen aus diesen Verzerrungen. In der nun folgenden Ableitung werden aber die Deformationen infolge der Querkräfte vernachlässigt, um einfache Ergebnisse zu erhalten. Diese dienen zur Ergänzung der Schubflusstheorie. Einige Berechnungen haben nämlich gezeigt, dass eine genauere Theorie, welche beide Einflüsse zusammenfasst, in den meisten Fällen nicht erforderlich ist.

1. Voraussetzungen

Wir betrachten einen geraden schlanken Kastenträger mit konstantem einfach symmetrischem Querschnitt (Bild 1 a). Jede äussere Last, die in einer Ebene senkrecht zur Trägeraxe den Kasten belastet, lässt sich durch eine Dyname (Kraft + Moment) im Schubmittelpunkt des Querschnittes ersetzen. Die Kraft beansprucht den Balken auf Biegung, die leicht zu berechnen ist. Das Moment erzeugt eine Torsionsbeanspruchung, der wir nun unsere Aufmerksamkeit zuwenden wollen. Wir betrachten also im Folgenden bloss vertikal an den Kastenwänden angreifende Kräftepaare P. Wenn sie gleichmässig verteilt sind, heissen sie p (Bild 2).

2. Schnittkräfte

In einem Schnitt ist die Resultierende aller inneren Kräfte immer ein Torsionsmoment T. Andere Kräfte können im Schnitt wegen den getroffenen Belastungsannahmen nicht auftreten. Die Ableitung des Torsionsmomentes ist:

$$\frac{dT}{dx} = t = pb \tag{1}$$

Im Schnitt treten an den Scheiben Schubspannungen τ und Normalspannungen σ auf. Die Schubspannungen jeder Scheibe lassen sich zusammenfassen zu den resultierenden Schubkräften Q_1, Q_2 (Bild 3), die das Torsionsmoment T bilden:

$$T = Q_1 \cdot b + Q_2 \cdot h \tag{2}$$

Es ist dann:

$$\frac{dT}{dx} = t = q_1 b + q_2 h \tag{2'}$$

wenn die Ableitungen der Querkräfte Q ersetzt werden durch q:

$$\frac{dQ}{dx} = q \tag{3}$$

Da wir einen schlanken Stab voraussetzen, können wir annehmen, die Normalspannungen σ seien über die einzelnen Scheiben linear verteilt, doch liegen sie nicht in einer Ebene, da der Kasten bei der Torsion verwunden wird (Bild 4). Die vier Eckspannungen werden so bestimmt, dass die Gleichgewichtsbedingungen erfüllt werden

$$\Sigma N = 0 \qquad \Sigma M_\xi = 0 \qquad \Sigma M_\eta = 0 \tag{4}$$

Die Kantenspannungen σ_2, σ_3, σ_4 und ihre Ableitung lassen sich dann als Funktionen der Spannung σ_1 wiedergeben:

$$\begin{aligned} \sigma_2 &= -\lambda \cdot \sigma_1 & \sigma_2' &= -\lambda \cdot \sigma_1' \\ \sigma_3 &= \lambda \cdot \sigma_1 & \sigma_3' &= \lambda \cdot \sigma_1' \\ \sigma_4 &= -\sigma_1 & \sigma_4' &= -\sigma_1' \end{aligned} \tag{4a}$$

Nach der Formel

$$\tau_\sigma d = \int_{s_0}^{s} \sigma' d\, ds + \tau_\sigma (s_0)\, d$$

werden dann die Schubkräfte längs den Kastenwänden analytisch oder graphisch bestimmt, wobei der Anfangswert $\tau_\sigma (s_0)\, d$ beliebig gewählt werden kann, weil wir die Deformationen infolge der Querkräfte vernachlässigen (Bild 5). Durch Integration der Schubkräfte $\tau_\sigma\, d$ an einer Scheibe erhalten wir die Querkräfte $Q_{\sigma i}$

$$Q_{\sigma_1} = \int_0^h \tau_\sigma\, d\, ds$$

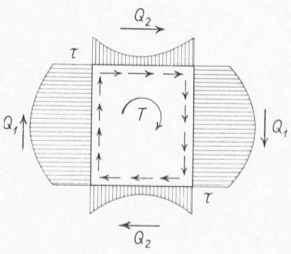

Bild 3. Schubspannungen am symmetrischen Kastenquerschnitt

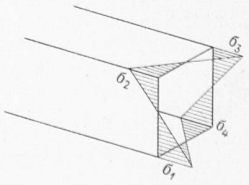

Bild 4. Normalspannungen am symmetrischen Kastenquerschnitt

Sie lassen sich ausdrücken als Funktionen von σ_1:

$$(5) \qquad Q_{\sigma_1} = W_1 \sigma_1' \qquad Q_{\sigma_2} = -\mathfrak{w}_1 W_1 \sigma_1'$$
$$q_{\sigma_1} = W_1 \sigma_1'' \qquad q_{\sigma_2} = -\mathfrak{w}_1 W_1 \sigma_1''$$

wenn

$$(6) \qquad \mathfrak{w}_1 = -\frac{Q_{\sigma_2}}{Q_{\sigma_1}}$$

Ausserdem tritt am Schnitt noch ein Schubfluss s auf. Die ihm entsprechenden Querkräfte nennen wir Q_s. Es ist dann:

$$(7) \qquad Q_{s_2} = Q_{s_1} \frac{b}{h}$$

und:

$$(7') \qquad \frac{d Q_{s_2}}{d x} = q_{s_2} = q_{s_1} \frac{b}{h}$$

Die Querkraft Q einer Scheibe setzt sich also zusammen aus den zwei Teilkräften Q_σ und Q_s, und die Gleichung (2) lässt sich auch schreiben:

$$(8) \qquad T = Q_{\sigma_1} b + Q_{\sigma_2} h + Q_{s_1} b + Q_{s_2} h$$
$$(8') \qquad t = q_{\sigma_1} b + q_{\sigma_2} h + q_{s_1} b + q_{s_2} h$$

Darin lassen sich Q_{σ_2} und Q_{s_2} mit Hilfe der Gleichungen (5) und (6) eliminieren:

$$(9) \qquad T = Q_{\sigma_1}(b - \mathfrak{w}_1 h) + Q_{s_1} 2 b$$
$$(9') \qquad p b = t = q_{\sigma_1}(b - \mathfrak{w}_1 h) + q_{s_1} 2 b$$
$$(10) \qquad q_{s_1} = \frac{p}{2} - \frac{q_{\sigma l}}{2}\left(1 - \mathfrak{w}_1 \frac{h}{b}\right)$$

Damit ist eine Gleichung für die beiden Unbekannten q_{σ_1} und q_{s_1} gefunden. Eine zweite Gleichung gewinnen wir, wenn wir die Deformationen der Scheiben mit den Verzerrungen des Kastens vergleichen.

3. Deformationen

Wenn die Querkräfte nicht berücksichtigt werden, so sind die Deformationen der Scheiben (Bild 6)

$$(11) \qquad \begin{aligned} \eta_1'' &= \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{E h} = \frac{\sigma_1}{E h}(1 + \lambda) \\ \xi_2'' &= \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{E b} = -\frac{\sigma_1}{E b} 2\lambda \\ \eta_3'' &= \frac{\sigma_3 - \sigma_4}{E h} = \frac{\sigma_1}{E h}(1 + \lambda) \\ \xi_4'' &= \frac{\sigma_4 - \sigma_1}{E b} = -\frac{\sigma_1}{E b} 2 \end{aligned}$$

Die Verzerrung lässt sich dann ausdrücken durch den Winkel γ

$$(12) \qquad \gamma = \frac{\eta_1 + \eta_3}{b} - \frac{\xi_2 + \xi_4}{h}$$

Wird dieser Ausdruck viermal differenziert und werden die Gleichungen (5) und (11) eingesetzt, so lässt sich folgende Gleichung aufstellen:

$$(13) \qquad \frac{d^4 \gamma}{d x^4} = q_{\sigma_1} \frac{4(1 + \lambda)}{E W_1 h b}$$

4. Verzerrung

Es wurde q definiert als die Ableitung der Querkräfte Q der einzelnen Scheiben. Es ist jedoch nicht gleich der äusseren Belastung der Scheiben, denn ausser dieser wirkt wegen der Steifigkeit des Profils (Rahmenwirkung) noch eine innere Belastung auf die Scheibe, wir nennen sie Verzerrungskraft q_v. Sie erzeugt die in Bild 7a gezeigten Momentenflächen und die entsprechenden Verzerrungen des Kastens (Bild 7b). Es ist:

$$(14) \qquad \begin{aligned} q_v &= p - q_1 = \\ &= p - q_{\sigma_1} - q_{s_1} \end{aligned}$$

Die Verzerrungen γ sind proportional dieser Verzerrungskraft

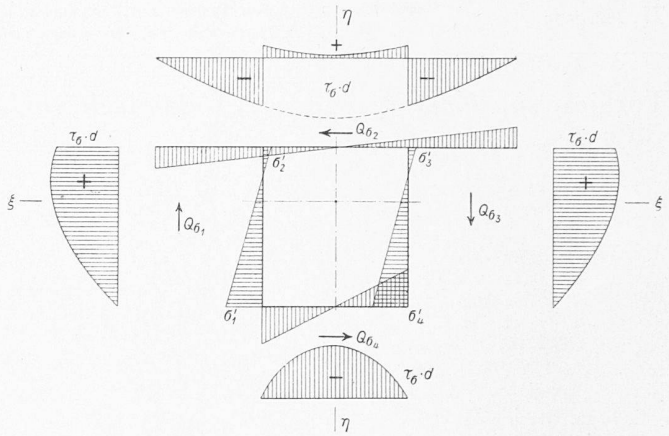

Bild 5. Schub- und Normalspannungen am Brückenquerschnitt

$$(15) \qquad \gamma = \frac{1}{E S} q_v$$

Der Ausdruck ES für die Steifigkeit des Profils lässt sich leicht berechnen, indem ein Kastenelement von der Länge 1 gelagert wird, wie Bild 7 b zeigt. Unter der Belastung $q_v = 1$ stellt sich eine Verzerrung λ_1 ein. Es ist dann:

$$ES = 1/\gamma_1$$

Die vierte Ableitung der Gleichung (15) lautet:

$$(16) \qquad \frac{d^4 \gamma}{d x^4} = \frac{1}{ES} \frac{d^4 q_v}{d x^4} = -\frac{1}{ES} \frac{d^4}{d x^4}(q_{\sigma_1} + q_{s_1})$$

wenn die Belastung p eine so einfache Funktion von x ist, dass deren vierte Ableitung verschwindet. Sie lässt sich mit Hilfe von Gl. (10 a) umformen zu:

$$(17) \qquad \frac{d^4 \gamma}{d x^4} = -\frac{1}{2 E S}\left(1 + \mathfrak{w}_1 \frac{h}{b}\right) \frac{d^4 q_{\sigma_1}}{d x^4}$$

Indem wir diesen Ausdruck der Gleichung (13) gleichsetzen, erhalten wir die Differentialgleichung des Problems:

$$(18) \qquad \frac{d^4 q_{\sigma_1}}{d x^4} + 4 \alpha^4 q_{\sigma_1} = 0$$

wobei

$$(19) \qquad \alpha = \sqrt[4]{\frac{2 S (1 + \lambda)}{W_1 h b\left(1 + \mathfrak{w}_1 \frac{h}{b}\right)}}$$

5. Lösungen

Die allgemeine Lösung der Differentialgleichung lautet:

$$(20) \qquad q_{\sigma_1} = e^{-\alpha x}(A \cos \alpha x + B \sin \alpha x) + e^{+\alpha x}(C \cos \alpha x + D \sin \alpha x)$$

Die Lösungsfunktion ist wie beim Problem des Balkens auf elastischer Bettung die Summe einer abklingenden und einer aufgeschaukelten Schwingung. Von einer Einzellast oder einem Auflager gehen abklingende Störungen aus, die in einer gewissen Entfernung von der Störungsquelle praktisch verschwinden. Es liegt daher nahe, bei der Untersuchung eines solchen Trägers den störungsfreien Zustand zu ermitteln und dann die Einflüsse der Störungen zu superponieren. Durch geeignete Wahl des Koordinatensystems für jede Störung kann die aufsteigende Funktion $e^{+\alpha x}$ zum Verschwinden gebracht werden.

Durch vierfache Integration erhalten wir nacheinander Ausdrücke für die Querkräfte, die Spannungen und die Deformationen:

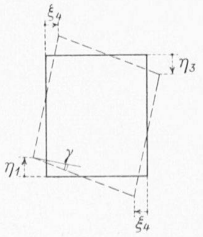

Bild 6. Verschiebungen der Eckpunkte

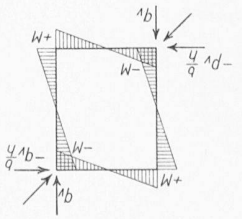

Bild 7a. Verzerrungskräfte am Kastenelement

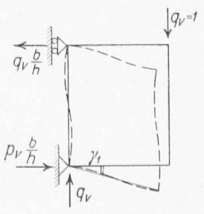

Bild 7b. Rahmenwirkung des Kastenelementes

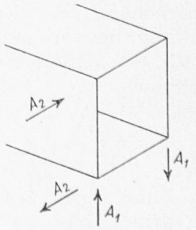

Bild 8. Ersatzkräfte am Auflager

$$q_{\sigma_1} = \frac{E W_1 h b}{4(1+\lambda)} \frac{d^4 \gamma}{d x^4} = e^{-\alpha x}\left(A \cos \alpha x + B \sin \alpha x\right)$$

$$Q_{\sigma_1} = \frac{E W_1 h b}{4(1+\lambda)} \frac{d^3 \gamma}{d x^3} = \frac{1}{2\alpha} e^{-\alpha x}\left((-A - B) \cos \alpha x + (A - B) \sin \alpha x\right)$$

(21) $$W_1 \sigma_1 = \frac{E W_1 h b}{4(1+\lambda)} \frac{d^2 \gamma}{d x^2} = \frac{1}{2\alpha^2} e^{-\alpha x}\left(B \cos \alpha x - A \sin \alpha x\right)$$

$$\frac{E W_1 h}{1+\lambda} \frac{d \eta_1}{d x} = \frac{E W_1 h b}{4(1+\lambda)} \frac{d \gamma}{d x} = \frac{1}{4\alpha^3} e^{-\alpha x}\left((A - B) \cos \alpha x + (A + B) \sin \alpha x\right)$$

$$\frac{E W_1 h}{1+\lambda} \eta_1 = \frac{E W_1 h b}{4(1+\lambda)} \gamma = \frac{1}{4\alpha^4} e^{-\alpha x}\left(-A \cos \alpha x - B \sin \alpha x\right)$$

Die Koeffizienten werden wie üblich mit Hilfe geschickt formulierter Randbedingungen bestimmt. Damit ist der Spannungszustand des Kastens bekannt, insbesondere kann auch die Verzerrungskraft q_v bestimmt werden, die uns für die Dimensionierung des Kastens besonders interessiert.

(22) $$q_v = \frac{p}{2} - \frac{q_{\sigma_1}}{2}\left(1 + \mathfrak{w}_1 \frac{h}{b}\right)$$

6. Einzellast

In der Mitte eines sehr langen Balkens greife eine Einzellast $2P$ an. An jedem Auflager muss also das Torsionsmoment $T = P \cdot b$ aufgenommen werden. Da an den Auflagern steife Schotten angeordnet sind, entspricht dort die Verteilung der Schubkräfte der Schubflusstheorie. Die Randbedingungen lassen sich dann folgendermassen formulieren:

$$x = \infty \quad : \quad q_{\sigma_1} = 0$$
$$x = 0 \quad : \quad \eta' = 0 \quad Q_1 = P, \quad Q_2 = 0$$

Diese müssen mit Hilfe der Gleichungen (5) und (6) umgeformt werden zu:

(23) $$Q_{\sigma_1} = P \frac{1}{1 + \mathfrak{w}_1 \frac{h}{b}}$$

Durch Einsetzen dieser Werte in die Gleichungen (21) erhalten wir die Koeffizienten

$$A = B = -P \frac{\alpha}{1 + \mathfrak{w}_1 \frac{h}{b}}$$

Damit lässt sich der Verlauf der Spannungen und der Verzerrungskräfte berechnen. Sie sind in Bild 9 dargestellt. Die grösste Spannung beträgt:

$$\sigma_{1\,\max} = \frac{P}{2\alpha W_1 \left(1 + \mathfrak{w}_1 \frac{h}{b}\right)}$$

Sie ist in unserem Fall vernachlässigbar klein. Da sich die Last auf eine gewisse Breite verteilt und die Kastenwand relativ hoch ist, entsteht natürlich unter dem Lastangriffspunkt keine Spannungsspitze. Wichtiger ist der Maximalwert der Verzerrungskraft:

(24) $$q_{v\,\max} = \frac{\alpha}{2} P$$

7. Einflusslinien der Auflagerkräfte

Grössere Schwierigkeiten bietet die Bestimmung der Einflusslinien für die Querkräfte an den Auflagern, da hier der Einfluss der Querkräfte auf die Deformationen nicht mehr vernachlässigt werden darf. Durch einen Kunstgriff kann aber die kompliziertere Differentialgleichung, die die Querkräfte mit berücksichtigt, umgangen werden.

Die Einflusslinie für eine Auflagerkraft an einem statisch unbestimmten System kann gewonnen werden, indem das Auflager durch eine Kraft ersetzt wird, die so gross ist, dass die Durchbiegung unter dem Angriffspunkt in Richtung der Kraft eins wird ($\delta_{AA} = 1$). Die entstehende Biegelinie ist dann die Einflusslinie.

Nach Bild 8 wird die steife Schotte am Auflager ersetzt durch zwei horizontale Auflagerkräfte A_2. (Die Einspannung im Rahmenbein bleibt erhalten.) Am andern Balkenende gelten die normalen Auflagerbedingungen: Steife Schotte, totale Einspannung.

Zur Ermittlung der Einflusslinie von A_1 müssen A_1 und A_2 so bestimmt werden, dass die Verschiebungen des Auflagers

(25) $$\eta_{A_1} = \eta_{A_3} = 1$$
$$\xi_{A_2} = \xi_{A_4} = 0$$

Für die Einflusslinie von A_2 müssen A_1 und A_2 den Bedingungen genügen

(26) $$\eta_{A_1} = \eta_{A_3} = 0$$
$$\xi_{A_2} + \xi_{A_4} = 2$$

Die Biegelinie η_1 ist dann die gesuchte Einflusslinie. Sie wird durch Superposition zweier Belastungsfälle ermittelt:

V. Reine Verzerrung ohne Verdrehung:

$$\overset{v}{A}_2 = -\overset{v}{A}_1 \frac{b}{h}$$

S. Reine Verdrehung ohne Verzerrung:

$$\overset{s}{A}_2 = +\overset{s}{A}_1 \frac{b}{h}$$

Die Biegelinie des ersten Belastungsfalles *V* erhalten wir durch Integration der Lösungsfunktion (21).

(27) $$\overset{v}{\eta}_1 = \frac{\overset{v}{A}_1 (1+\lambda)}{\alpha^3 E W_1 h \left(1 + \mathfrak{w}_1 \frac{h}{b}\right)} e^{-\alpha x}\left(\cos \alpha x + \sin \alpha x\right)$$
$$\overset{v}{\xi}_2 = -\frac{2\lambda}{1+\lambda} \frac{h}{b} \overset{v}{\eta}_1$$

Die Biegelinie des zweiten Belastungsfalles *S* ist eine Gerade. Die Deformation des Kastens bei reinem Schubfluss ist ungefähr:

(28) $$\overset{s}{\eta}_1 = \frac{\overset{s}{A}_1 b}{2 G h^2} \left(\frac{1}{d_2} + \frac{1}{d_4}\right)(l - x)$$
$$\overset{s}{\xi}_2 = \overset{s}{\eta}_1 \frac{h}{b}$$

Die Einflusslinien für die in Bild 1 gezeichnete Brücke sind in Bild 10 dargestellt. Die steifen Schotten an den Auflagern müssen zum Ausschalen der Brücke eine grosse Oeffnung aufweisen und sind daher wie Portalrahmen ausgebildet (Bild 11). Sie müssen auf die Kraft A_2 berechnet werden.

Bild 9. Abklingen der Spannungen σ_1 und der Verzerrungskräfte q_v

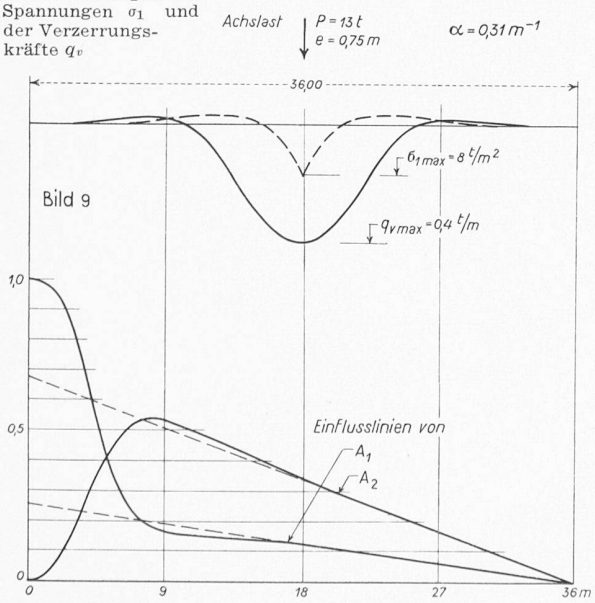

Bild 10. Einflusslinien der Auflagerkräfte

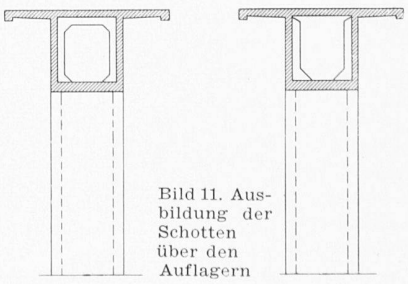

Bild 11. Ausbildung der Schotten über den Auflagern

8. Querkräfte

In den Ausdrücken (11) für die Deformationen lassen sich die Querkräfte leicht mit berücksichtigen. Die Differentialgleichung (18) wird dann komplizierter und erlaubt eine Kritik der vereinfachten Methode. Es zeigt sich dann, dass die Formel (24) die maximale Verzerrungskraft etwas zu klein angibt. Bei einem quadratischen Kasten, dessen Wandstärke sich zur Seitenlänge verhält wie 1:10, beträgt der Fehler etwa 5 %, bei einem Verhältnis 1:5 beträgt er etwa 11 %. Es ist also ein Zuschlag zur berechneten Verzerrungskraft zu geben.

9. Wirtschaftlichkeit

Ob eine solche Rahmenbrücke konkurrenzfähig ist, hängt natürlich ausser von den geforderten Abmessungen auch von den Belastungsvorschriften ab. Die schwedischen Normen schreiben z. B. für eine solche Brücke nur ein Fahrband von 3 m Breite vor; neben diesem Fahrband muss keine Belastung angenommen werden. Hier wirkt sich der Vorteil der Torsionssteifigkeit natürlich besonders günstig aus. Durch Vouten kann die Wirtschaftlichkeit eines solchen Tragwerks beträchtlich erhöht werden, doch wird dadurch die Berechnung sehr erschwert, wenn nicht durch geschickte Wahl der Querschnitte dafür gesorgt wird, dass der Wert α über die ganze Länge der Brücke konstant bleibt.

Im Fall der erwähnten schwedischen Brücke ergaben sich die Kosten des Ueberbaues zu rd. 30 000 SKr. gegenüber 35 000 SKr. einer unten offenen Brücke, mit oder ohne Vorspannung.

Der Strahlungskessel der Firma Bouëllat

DK 621.181.527

Die Firma Chaudières Bouëllat, Paris, hat den auf Bild 1 dargestellten Dampferzeuger, Typ Export, entwickelt, der für Dampfdrücke bis 50 kg/cm² und für Heizflächen von 5 bis 600 m² gebaut wird. Der Kessel besteht aus einer oberen grossen Trommel 1, die durch zwei gebogene Rohrbündel 2 mit zwei unteren kleineren Trommeln 3 verbunden ist. Die aus Siederohren von 51 mm l. W. und 3,5 mm Wandstärke bestehenden Bündel umschliessen den Feuerraum. Sie sind so angeordnet, dass ihre Verbindungsstellen mit den Trommeln gegen direkte Bestrahlung weitgehend geschützt sind.

Der Feuerraum 4 erstreckt sich auf die ganze Länge des Kessels, wie aus dem Grundriss ersichtlich ist. Hinter den beiden innersten Rohrreihen der beiden Bündel ist auf beiden Seiten je eine Zwischenwand 5 angebracht, die von der vorderen Stirnwand bis nahe an die hintere Stirnwand reicht und zur Führung der Rauchgase dient. Diese Gase treten durch den Spaltraum bei 6 in die Kammer über, in der nötigenfalls ein Ueberhitzer 7 eingebaut werden kann. An diese Kammer schliessen sich von hinten nach vorn weitere kleinere Kammern an, die durch vertikale Querwände 8 gebildet werden und die Rauchgase zwingen, den durch die Pfeile angedeuteten Weg zu nehmen. Diese Gase bespülen dabei die in diesen Kammern angeordneten Siederohre, um schliesslich unmittelbar hinter der vordern Stirnwand bei 9 ins Kamin überzutreten.

Das Wasser wird bei 12 in die obere Trommel eingespiesen; es fällt durch die vordersten Rohre der Konvektionszonen, die sich in den vordersten Aussenkammern 8 befinden, nach den beiden Seitentrommeln 3 hinunter und steigt durch die übrigen Siederohre wieder hoch, wobei ein Teil verdampft. Auf diese Weise ergibt sich eine sehr intensive Wasserumwälzung, die allfällige Ausscheidungen in fester Form fortschwemmt. Diese sammeln sich hauptsächlich in den beiden Seitentrommeln, wo sie abgeschlämmt werden können. Dank der grossen Wasseroberfläche in der oberen Trommel 1 ist die Ausdampfung nicht stürmisch, und man erhält trockenen Dampf.

Die Wärmeübertragung erfolgt bei der vorliegenden Konstruktion zu einem sehr grossen Teil durch Strahlung vom Rost an die Rohrwände, die den Feuerraum umgeben. Die äusseren Teile der Rohrbündel, die durch Konvektion geheizt werden, sichern eine weitgehende Ausnützung der in den Rauchgasen verfügbaren Wärme und damit einen guten Wirkungsgrad. Die für die Wärmeübertragung sehr günstigen Verhältnisse ergeben kleinen Grundflächen- und kleinen Raumbedarf und damit geringe Zusatzkosten für den Einbau. Einheiten bis zu grossen Leistungen können im Erstellungswerk vollständig fertiggestellt und dann per Bahn, per Camion oder per Schiff an den Bestimmungsort gebracht werden.

Die obere Trommel 1 stützt sich über die beiden Rohrbündel 2 auf die beiden unteren Trommeln 3 ab, die auf dem Fundament aufruhen. Sie kann sich nach oben frei ausdehnen. Der von den Rauchgasen erfüllte Raum wird nach aussen durch ein Blechgehäuse direkt abgeschlossen, das aussen wirksam isoliert ist. Der Feuerraum ist so gross, dass jede geeignete Rostkonstruktion, passend für alle in Frage kommenden festen Brennstoffe (Fettkohle, Magerkohle, Holz, Abfälle aus Industrie oder Landwirtschaft), eingebaut werden kann. Ebenso lassen sich Brenner für Brennöle oder für Gas verwenden. Da die Kessel im Lieferwerk mit Blechverschalung, Isolierung und Zwischenwänden fertig zusammengebaut werden, lassen sich die Montagearbeiten rasch und in einfacher Weise durchführen.

Für die innere Reinigung ist an der oberen Trommel ein Mannloch 10 und an den beiden untern Trommeln in jedem Stirndeckel je ein Handloch 11 angebracht. Dank der einfachen Form und dem Fehlen von toten Säcken eignet sich der Kessel besonders gut zur Entkalkung mit hierfür geeigneten Säuren. Insbesondere lässt sich eine nachherige Spülung ohne Schwierigkeiten vornehmen. Sollte sich eine mechanische Entkalkung als nötig erweisen, so lässt sie sich von der oberen Trommel aus mit Hilfe eines Fräsers mit flexibler Welle leicht durchführen, da alle Rohre den selben Durchmesser aufweisen und nur schwach gekrümmt sind. Zum Wegblasen des Russes auf der Aussenseite der Rohre sind verschiedene Batterien von Russbläsern zwischen die Rohrbündel eingebaut.

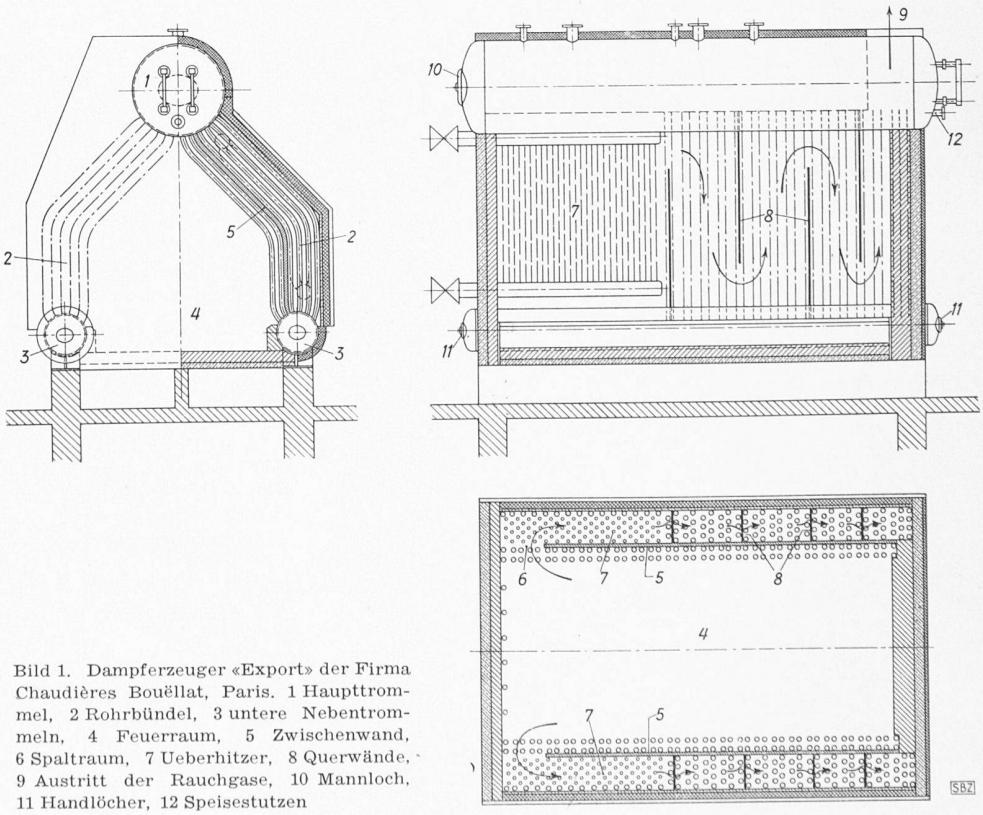

Bild 1. Dampferzeuger «Export» der Firma Chaudières Bouëllat, Paris. 1 Haupttrommel, 2 Rohrbündel, 3 untere Nebentrommeln, 4 Feuerraum, 5 Zwischenwand, 6 Spaltraum, 7 Ueberhitzer, 8 Querwände, 9 Austritt der Rauchgase, 10 Mannloch, 11 Handlöcher, 12 Speisestutzen