

Versuche zum Tragverhalten von
geschweißten kastenförmigen
Zweifelträgern mit schlanken Stegen

T 2653

T 2653

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Die Originalmanuskripte wurden reprototechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprototechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

Vervielfältigung, auch auszugsweise,
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69
70504 Stuttgart

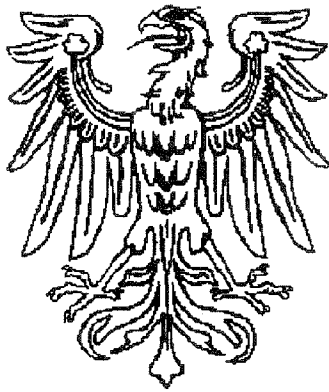
Nobelstraße 12
70569 Stuttgart

Telefon (07 11) 9 70 - 25 00
Telefax (07 11) 9 70 - 25 08

E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de

Technische Universität Cottbus
Lehrstuhl für Stahlbau



Bericht Nr. 102

Versuche zum Tragverhalten von geschweißten
kastenförmigen Zweifeldträgern mit schlanken Stegen

Auftraggeber:
Deutsches Institut für Bautechnik
Reichpietschufer 74 - 76
D-10785 Berlin
Az.: IV 1-5-712/93

Cottbus 1994

Inhaltsverzeichnis

1 Zielstellung	1
2 Versuchsplanung und -ausführung	1
3 Versuchsdurchführung	3
4 Numerische Simulation des Tragverhaltens	5
5 Auswertung der Versuche	7
6 Literatur	10

1 Zielstellung

Das Ziel dieses Forschungsvorhabens besteht darin, experimentell zu untersuchen, ob grundsätzlich das Tragverhalten von Kastenträgern mit schlanken Stegen bei statisch unbestimmter Lagerung dem gedrungener Träger entspricht und ob die Beanspruchung mit den üblichen Methoden der technischen Biegelehre ermittelt werden können.

2 Versuchsplanung und -aufbau

Entsprechend der Leistungsbeschreibung zum Forschungsvorhaben war die Durchführung von zwei Versuchen an geschweißten, zweifeldrig durchlaufenden Kastenträgern geplant.

Gegenstand des ersten Versuchs war ein Kastenträger mit sehr schlanken Stegen und kräftigen Flanschen (Bild 1). Die Stegseiten werden durch die in gleichmäßigem Abstand angeordneten Quersteifen in acht quadratische Teilfelder aufgeteilt. Die Quersteifen haben die Abmessung $5 \times 180 \times 300$ mm. Die Dicke der Quersteifen über den Auflagern beträgt bei sonst gleichen Abmessungen 8 mm, um ein vorzeitiges Versagen des Trägers durch die konzentrierte Lasteinleitung in diesem Bereich zu verhindern. Aus dem durch die Quersteifenmaße festgelegten Stegabstand von 180 mm ergibt sich ein 20 mm großer beidseitiger Gurtüberstand, der für das Mittragen der Gurte erforderlich ist.

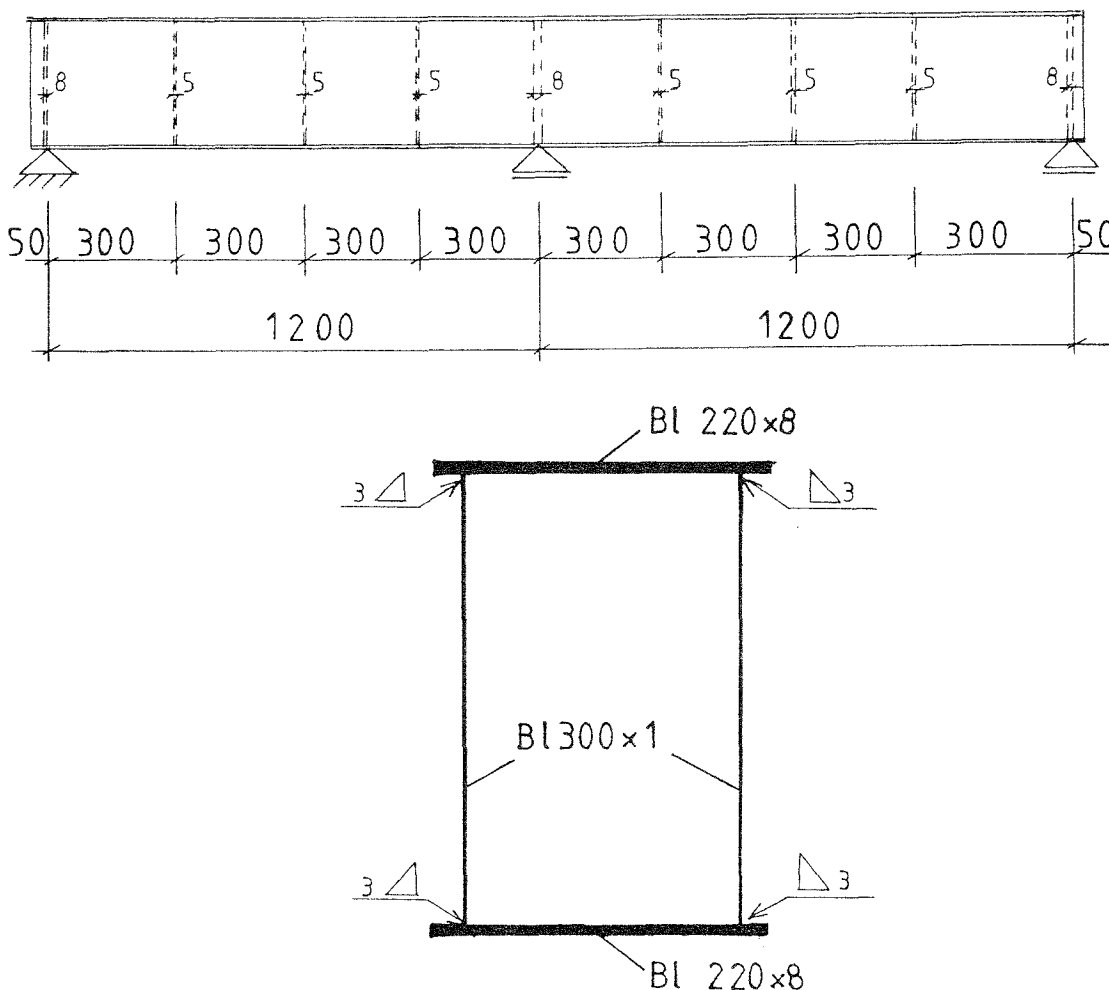


Bild 1 Abmessungen des Versuchsträgers 1

Im Rahmen der Versuchsauswertung wurde der Kastenträger mit dem FEM-Programm ABAQUS [1] nachgerechnet. Der Vergleich der Ergebnisse von Versuch und Nachrechnung (s.a. Abs. 5) zeigte bezüglich der o.g. Zielstellung eine befriedigende Übereinstimmung.

Davon ausgehend wurde die experimentelle Untersuchung eines zweiten Versuchsträgers zurückgestellt und stattdessen durch eine numerische Simulation des Tragverhaltens unter Verwendung des Programms ABAQUS ersetzt.

Für diesen zweiten "Versuchskörper" wurden nur die Blechdicken der Flansche und der Stege modifiziert (Tab. 1, Zeile 2). Alle anderen Parameter sind für beide Träger identisch.

Tab. 1 Querschnittsmaße der Versuchsträger

Träger	b_f [mm]	t_f [mm]	b_f / t_f	b_w [mm]	t_w [mm]	b_w / t_w	b_f / b_w	t_f / t_w
1	220	8	27,5	300	1	300	0,73	8,0
2	220	5	44,0	300	2	150	0,73	2,5

Für die entnommenen Materialproben wurden die Werkstoffkennwerte im Zugversuch nach DIN 50125 bestimmt (Tab. 2). Für die dünnwandigen Stegbleche konnte keine ausgeprägte Streckgrenze bestimmt werden. Darüber hinaus weist die Spannungs-Dehnungslinie der Stegproben unterhalb des Fließplateaus keinen klar definierten Hooke'schen Bereich auf, so daß den Proben kein eindeutiger Elastizitätsmodul als Tangentenanstieg im linearen Bereich zugeordnet werden kann. Für die FEM-Berechnungen wird den Stegen ein auf der sicheren Seite liegender gemittelter Elastizitätsmodul und als Streckgrenze die Spannung bei einer Dehnung von 2 % zugeordnet.

Tab. 2 Materialkennwerte der Zugproben

Bauteil	f_y [N/mm ²]	f_u [N/mm ²]	E [N/mm ²]
Gurte	335,8	411,8	210000
Stege	161,6	291,5	190000
Zwischensteifen	240,0	398,7	195000
Auflagersteifen	360,0	416,7	209000

Die Messung der Blechdicken mittels Ultraschall-Dickenmeßgerät ergab als Mittelwerte für die Gurte $t_f = 7,71$ mm und für die Stege $t_w = 0,97$ mm, die auch den numerischen Untersuchungen zugrunde gelegt wurden.

Der Aufbau, des an der TU Braunschweig durchgeführten Versuchs, geht aus den Bildern 2 und 3 hervor.

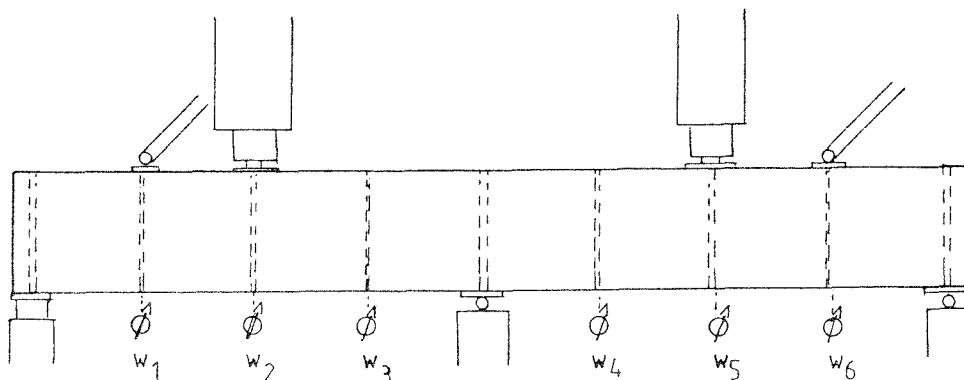


Bild 2 Skizze des Versuchsaufbaus

Die für die Untersuchungen erforderliche Messung der Stützkräfte erfolgte am linken Auflager. Dazu wurde an dieser Stelle ein 500 kN-Kraftmeßring (Typ C6, Hottinger Baldwin Meßtechnik HBM, Darmstadt) verwendet.

Zur gleichmäßigen Lastverteilung wurden an den Auflagerpunkten sowie an den Lastangriffspunkten der Pressen zusätzlich Bleche (Bl 16x95x220-St 37) an die Gurte geheftet. Zur Lastzentrierung und zur Reduzierung von Reibungseinflüssen diente eine Kugel zwischen dem Zusatzblech und dem Kraftmeßring unter dem linken Auflager.

Dieses Auflager wurde durch die Befestigung mit Trägerklemmen an der Unterkonstruktion als horizontal unverschiebliche Stützung ausgebildet. Die beiden anderen Lager bestehen, dem statischen System entsprechend, aus Rollen zwischen den Lastverteilungsblechen und der Unterkonstruktion.

Das Drillknicken des Trägers während des Versuchs wurde durch seitliche Abstützungen des Obergurtes (Gerüststangen) über den Zwischensteifen neben den Endschotten verhindert.

Als Versuchsbelastung wurde eine Einzellast in der Mitte jedes Feldes über 500 kN Lukas-Druckpressen, die an einer quer über den Versuchsstand laufenden Rahmenkonstruktion befestigt waren, eingeleitet. Zwischen den Pressen und dem Obergurt wurde jeweils eine 500 kN Kraftmeßdose (Typ C1, HBM Darmstadt) angeordnet.

Unter jeder Zwischensteife wurden in Untergurtmitte die vertikalen Durchbiegungen mit Wegaufnehmern (HBM, 5.05 ÷ 5.10) gemessen.

Alle Meßeinrichtungen waren zur Datenaufzeichnung an eine digitale Vielstellenmeßanlage UPM 60 angeschlossen.

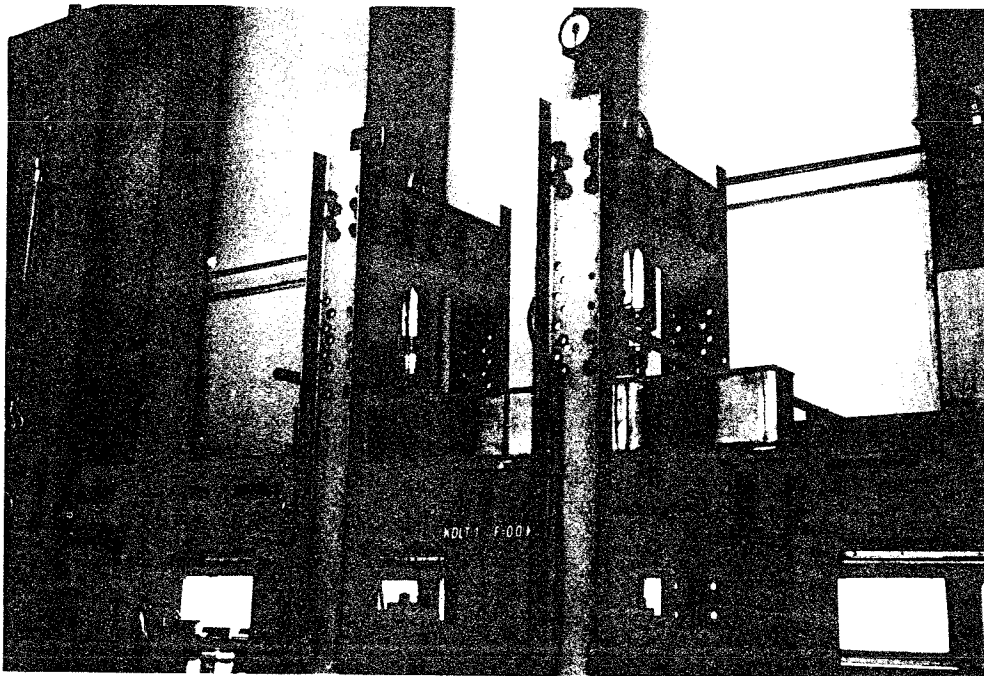


Bild 3 Versuchsaufbau

3 Versuchsdurchführung

Die Pressen wurden über zwei voneinander unabhängigen Öldruckpumpen mit Handbetrieb gesteuert. Die Belastung wurde kontinuierlich und gleichmäßig gesteigert, wobei die Gleichheit der Pressenkräfte mit Hilfe einer Bildschirmausgabe kontrolliert wurde. Die Belastungsgeschwindigkeit wurde näherungsweise konstant gehalten und betrug bis zum Erreichen der idealen Beulspannung der Stege etwa 0,1 kN/s. Für verschiedene Zwischenstadien wurde der Versuch für dokumentarische Zwecke angehalten.

Der Versuchsträger wurde zunächst mit einer Last von 50 kN je Presse belastet und wieder entlastet. Zu diesem Zeitpunkt ($t=900$ s) waren noch keine Stegbeulen zu erkennen und die Durchbiegung des Trägers war vergleichsweise gering (Tab. 3).

Nach der Wiederbelastung wurden die ersten Stegbeulen bei einer Einzellast von 94,9 kN beobachtet. Danach war mit zunehmender Belastung die Ausbildung der typischen Zugfelder in den Stegen gut zu erkennen (Bild 4).

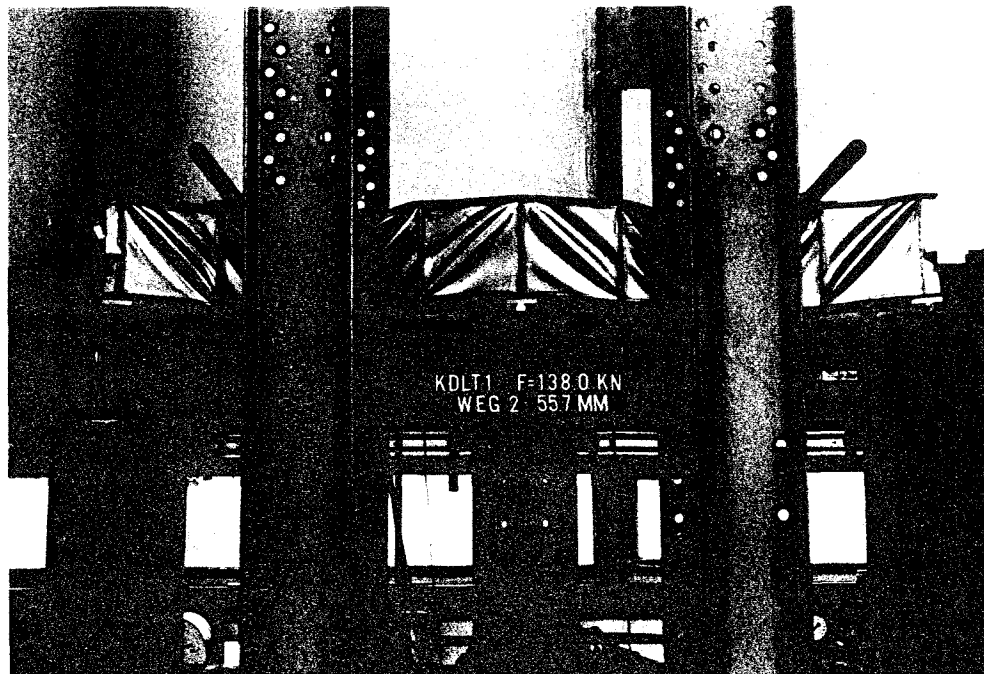


Bild 4 Versuchsträger unter Pressenkraft 138 kN

Gleichzeitig war eine schnelle Zunahme der Trägerdurchbiegungen zu beobachten, was auch aus Tab. 3 hervorgeht. Beim Vergleich der gemessenen Wege im linken Feld mit denen im rechten Feld fällt auf, daß das linke Feld sich weicher verhält als das rechte, was sich bei der Versuchsdurchführung auch dadurch bemerkbar machte, daß bei der linken Presse mehr Hubvorgänge für die gleiche Kraftzunahme erforderlich waren als rechts. Der Grund hierfür liegt in der Nachgiebigkeit des Kraftmeßbrings unter dem linken Auflager.

In Bild 4 ist die Ausbildung von Fließgelenken unterhalb der Pressen im Untergurt und oberhalb des Mittelaufagers im Obergurt zu sehen. Vor Erreichen der Traglast stellten sich im Obergurt im rechten (linken) Feld neben der linken (rechten) Presse weitere Fließgelenke ein. Die Traglast des Versuchsträgers wurde bei einer linken Pressenkraft von $F_{Li}=146,58$ kN erreicht. Anschließend wurde bei einer konstanten Kraft $F_{Li} = 138$ kN die rechte Pressenkraft noch von 148,27 kN auf 160,59 kN erhöht, was mit einem Abfall der Stützkraft des linken Endauflagers und einer beträchtlichen Zunahme der Durchbiegungen im rechten Feld verbunden war. Die größere Beanspruchbarkeit des rechten Feldes liegt in der bereits erwähnten "Weichheit" des linken Feldes.

Tab. 3 Pressenkräfte $P_{Li,Re}$, Durchbiegungen w_{1-6} und Auflagerkräfte A

F_{Li} [kN]	F_{Re} [kN]	A [kN]	w_1 [mm]	w_2 [mm]	w_3 [mm]	w_4 [mm]	w_5 [mm]	w_6 [mm]
50,00	50,00	22,58	0,39	0,46	0,25	0,42	0,64	0,45
100,00	100,00	50,35	2,20	3,00	1,46	0,93	1,70	1,10
125,14	125,88	63,55	9,20	14,70	7,00	3,80	7,90	4,80
146,58	148,27	75,15	26,00	44,00	17,30	10,50	22,80	13,30
138,00	160,59	71,57	32,00	55,70	18,73	17,90	54,68	30,59

4 Numerische Simulation des Tragverhaltens

Abweichend vom Forschungsantrag wurde das Tragverhalten des zweiten Kastenträgers nicht im Versuch sondern in einer numerischen Simulation mit Hilfe der Finiten-Elemente-Methode untersucht. Dazu wurde das am Lehrstuhl für Stahlbau der TU Cottbus vorhandene FEM-Programmpaket ABAQUS (Version 5.3) verwendet. Die Berücksichtigung von geometrischen (große Deformationen) und strukturellen (plastisches Materialverhalten, große Verzerrungen) Nichtlinearitäten ist ein wesentliches Merkmal des Programms ABAQUS und für die hier berechneten Kastenträger mit schlanken Stegen, die ein ausgeprägtes überkritisches Tragverhalten aufweisen, unabdingbar.

Zur Kalibrierung des Programms diente die Nachrechnung des durchgeführten Versuches, um die Zuverlässigkeit der Berechnungsergebnisse zu gewährleisten und die Möglichkeit der numerischen Traglastanalyse des zweiten "Versuches" zu überprüfen.

Zur Reduzierung des Berechnungsaufwandes wurde jeweils nur eine Trägerhälfte untersucht. Als Materialkennwerte wurden die Daten der Zugproben (Tab. 2) verwendet.

Die FE-Netze für die beiden Träger unterscheiden sich bezüglich der Diskretisierung von Gurten und Steifen, die für den zweiten "Versuchsträger" wegen der geringeren Gurtstärke verfeinert wurde.

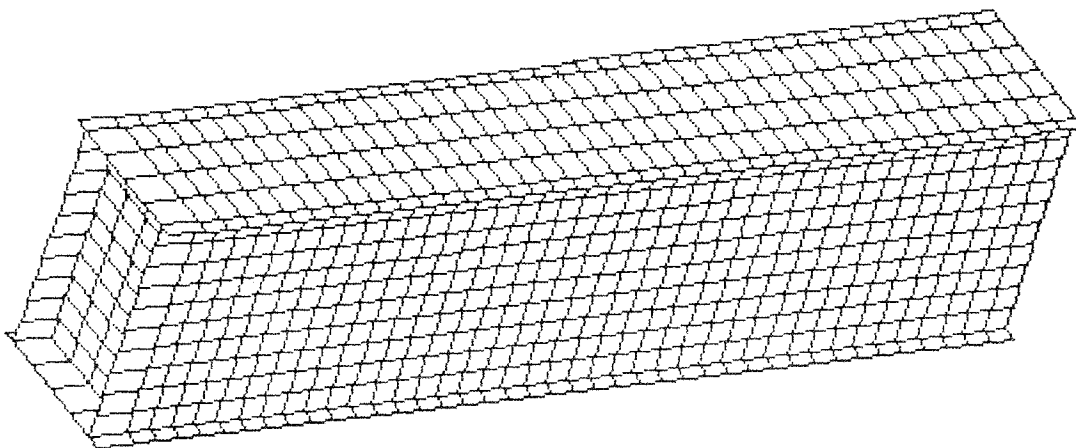


Bild 5a FEM-Netz für die Berechnung des 1. Trägers

Das Tragverhalten wird in der Berechnung qualitativ richtig erfasst, wie ein Vergleich der Bilder 4 und 6 zeigt. Trotz der guten Übereinstimmung von experimenteller ($F = 148,27$ kN) und rechnerischer Traglast ($F = 137$ kN) ist die Abweichung in der Größe der Durchbiegungen (Bild 8) zwar beträchtlich, dies ist aber für die Untersuchung der Durchlaufwirkung nicht maßgebend. Es kann somit davon ausgegangen werden, daß eine alleinige numerische Untersuchung des zweiten Trägers gerechtfertigt ist.

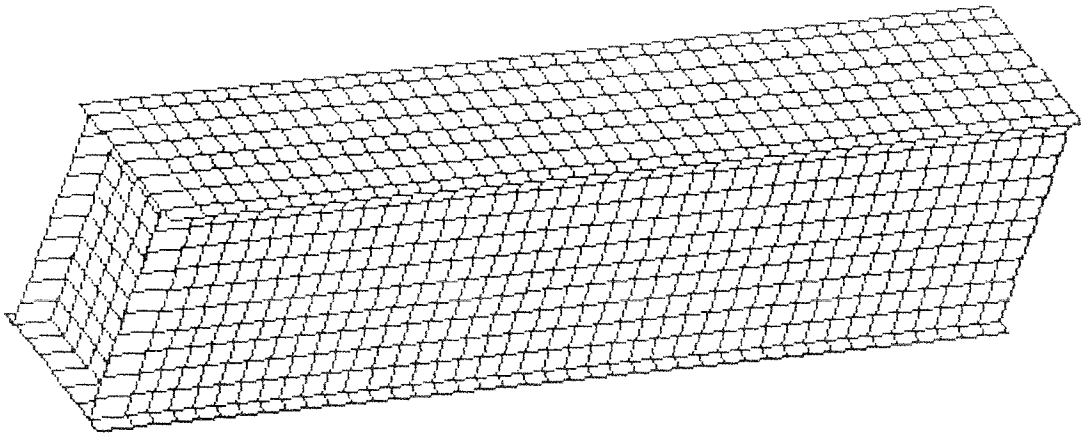


Bild 5b FEM-Netz für die Berechnung des 2. Trägers

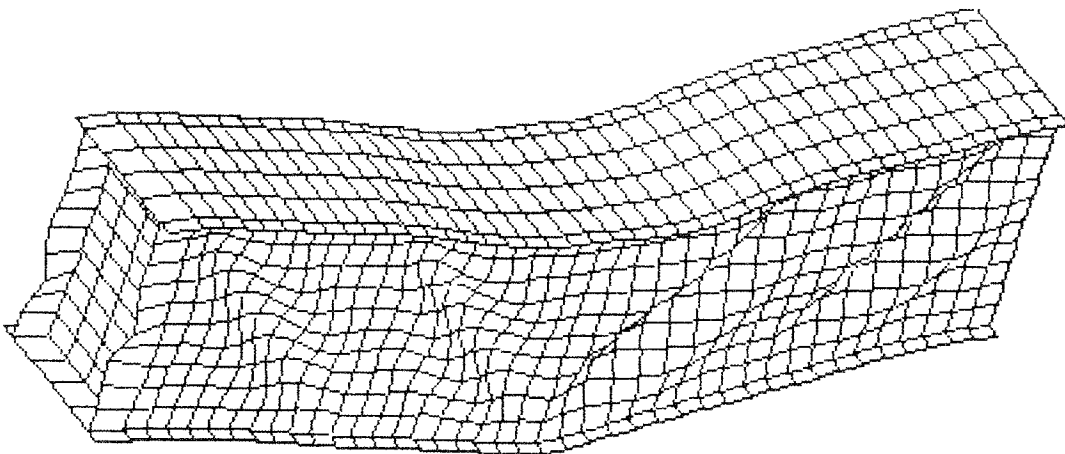


Bild 6 Träger 1, FE-Berechnung: Verformungsfigur im Traglastzustand für $F = 137 \text{ kN}$

Die Traglast des zweiten "Versuchsträgers" wurde bei 188 kN erreicht. Die dazugehörige Verformungsfigur geht aus Bild 7 hervor. Die Entwicklung von Zugfeldern findet nur im ersten und dritten Stegfeld statt, während das zweite und das vierte Stegfeld nahezu unverformt bleiben. Gut zu erkennen ist die Ausbildung von Fließgelenken im ersten und dritten Feld des Obergurtes sowie unter der ersten und zweiten Zwischensteife im Untergurt, die zum Versagen des Trägers führte.

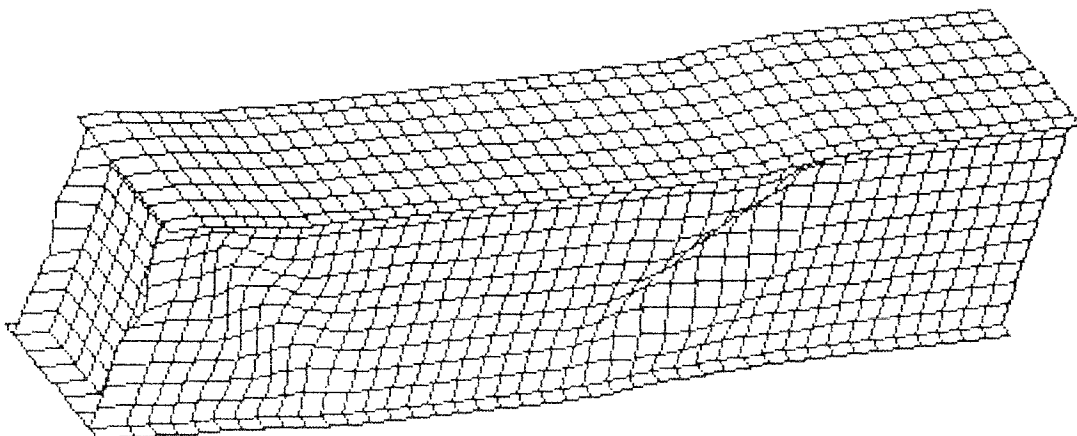


Bild 7 Träger 2, FE-Berechnung: Verformungsfigur im Traglastzustand für $F = 188 \text{ kN}$

Die Größe der Durchbiegungen bis zum Traglastzustand bleibt moderat (Tab. 4) und ist deutlich kleiner, verglichen mit den Ergebnissen der Nachrechnung des ersten Versuches.

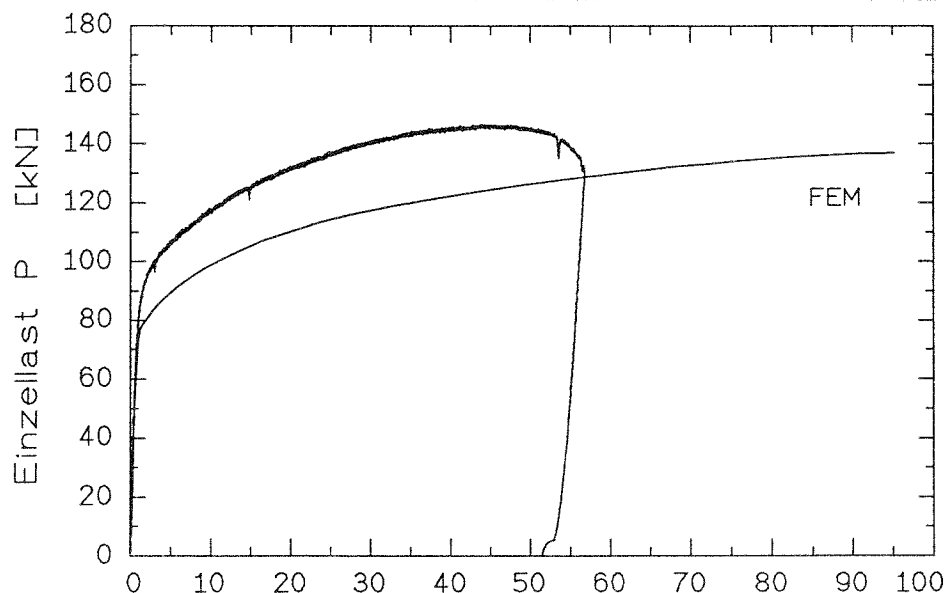
Tab. 4 Kraft F_{Li} , Durchbiegungen $w_{1,3}$ und Auflagerkräfte A

F_{Li} [kN]	A [kN]	w_1 [mm]	w_2 [mm]	w_3 [mm]
48,7	17,63	0,15	0,26	0,14
102,6	37,11	0,32	0,55	0,31
128,4	46,50	0,41	0,69	0,39
142,8	51,81	0,45	0,77	0,44
168,9	74,30	0,83	1,48	0,46
187,5	92,30	18,05	20,45	1,41

5 Auswertung der Versuche

Für die abschließende Versuchsauswertung stehen die Ergebnisse des durchgeführten Traglastversuchs (1), die Ergebnisse der Nachrechnung dieses Versuchs (2) und die Berechnungsergebnisse (3) für den zweiten Träger zur Verfügung.

In Bild 8 sind die Pressenkräfte über der Durchbiegung w_2 für die beiden ersten Fälle aufgetragen. Wie bereits im vorangegangenen Abschnitt dargestellt, liegt die prozentuale Abweichung der Traglast von 137 kN (FEM) zu 146,58 kN im Versuch mit 6,5 % innerhalb einer vertretbaren Grenze. Die berechneten Durchbiegungen weichen dagegen beträchtlich von den Versuchswerten ab. Ursache dafür ist die zu vereinfachte Modellierung des Werkstoffverhaltens innerhalb des Programms ABAQUS.

Bild 8 Pressenkräfte [kN] über Durchbiegung w_2 [mm]

Im Bild 9 wird das Verhältnis der Auflagerkräfte $\alpha = B_{links} / A$ über der Einzellast P verglichen. Die Kraft B_{links} stellt den Anteil der Mittelaullagerkraft B dar, der sich aus der Belastung der linken Trägerhälfte ergibt.

Da eine Messung der Auflagerkraft B im Versuch nicht erfolgte, um den Einfluß einer elastischen Stützung, infolge der Nachgiebigkeit einer Kraftmeßdose, auszuschließen [2], wurde für die Gegenüberstellung mit der FEM-Berechnung die Kraft B_{links} aus dem Gleichgewicht der Vertikalkräfte am linken Trägerabschnitt $B_{links} = F_{links} - A$ bestimmt.

Der Quotient α stellt ein direktes Maß für die Durchlaufaufeigenschaften der Kastenträger dar. Nach der Balkentheorie ergibt sich ohne Berücksichtigung der Schubverzerrungen der Wert

$\alpha = 2,2$ [3] und unter Berücksichtigung von Schubverzerrungen der Wert $\alpha = 1,53$, der mit dem dem Programm RSTAB ermittelt wurde.

Diese Werte für α werden im Versuch nicht erreicht. Man erkennt im Bild 9, daß das Verhältnis der Auflagerkräfte im Versuch nach anfänglichen Schwankungen, die auf das "Anlegen" der Pressen und der Wegaufnehmer an den Versuchskörper zurückzuführen sind, bei einer Pressenkraft von ca. 50 kN sein Maximum mit $\alpha = 1,25$ erreicht und danach kontinuierlich abnimmt, um sich bei einer Last von etwa 97 kN auf den Wert 1,0 einzupendeln. Diese Grenzlast liegt in der Nähe der idealen Beullast der Stege.

Der Kastenträger verhält sich somit im überkritischen Tragzustand wie zwei Einfeldträger, wobei die Durchlaufwirkung auch vor dem Stegbeulen gering ist. Ursache dafür ist der Einfluß der Querkkräfte, die wegen der schlanken Stege beträchtliche Schubverzerrungen hervorrufen, deren sonst übliche Vernachlässigung im Stahlbau nicht mehr zulässig ist [2, 4- 6]. Die Momententragfähigkeit über dem Mittelauger wird nach Überschreitung der elastischen Grenzlast, in diesem Fall ca. 54 kN, infolge der vorhandenen Querkraft reduziert. Dies führt zu einer Momentenumlagerung in den Feldern. Mit zunehmender Beanspruchung wird die Durchlaufwirkung abgebaut, bis sich eine Momentenverteilung wie für zwei Einzelträger einstellt.

Der im Obergurt deutlich ausgeprägte Knick (Bild 4) stellt kein plastisches Fließgelenk, sondern ein "Nachbeulgelenk" [7, 8] infolge plastischer Querkraftverformungen dar.

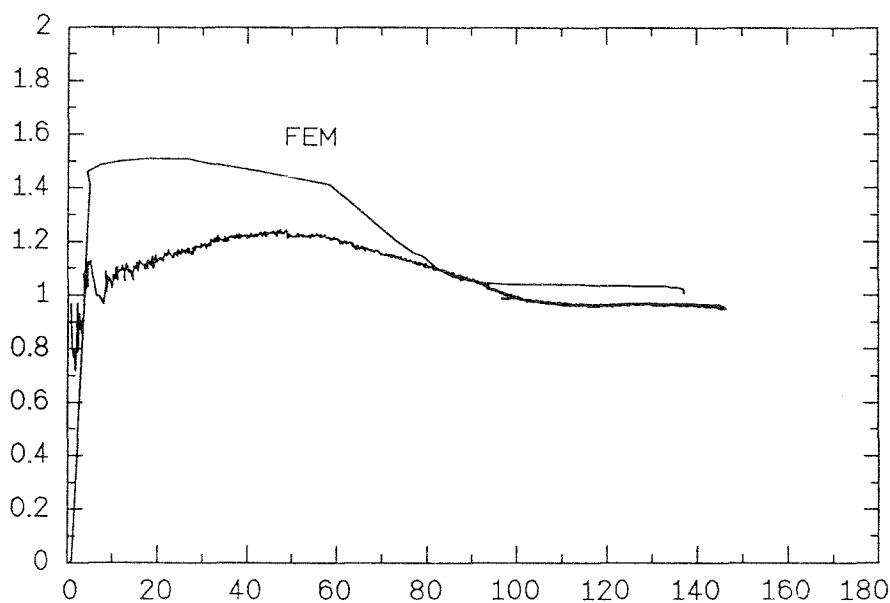


Bild 9 Verhältnis der Auflagerkräfte über Pressenkraft F für Versuchsträger I

Das FE-Programm ABAQUS nähert den Versuch im elastischen Bereich von oben an. Ab einer Belastung von 75 kN stimmen die Werte von Versuch und Nachrechnung jedoch sehr gut überein. Im Bereich zwischen 81 kN und 93 kN liefern beide Kurven identische Ergebnisse.

Zusammenfassend läßt sich aber feststellen, daß mit der Nachrechnung des ersten Versuchsträgers mit ABAQUS bezüglich der Durchlaufwirkung im überkritischen Tragzustand befriedigende Ergebnisse erzielt werden.

Davon ausgehend werden für die weitere Auswertung nur die Berechnungsergebnisse für beide Träger herangezogen, da diese auf einheitlicher Grundlage (FEM) ermittelt wurden.

In Bild 10 sind die Kräfte P über der Durchbiegung w_2 für beide Träger gegenübergestellt. Dabei wird deutlich, daß die Stegdicke b_w einen entscheidenden Einfluß für auf die

Tragfähigkeit hat. Der prozentuale Unterschied zwischen der Traglast von 137 kN für den 1. Träger und der Traglast von 187,5 kN für den 2. Träger liegt bei 37 %.

Über die Entwicklung der Durchbiegungen kann keine zuverlässige Aussage getroffen werden, da für den 2. Träger das Gurtversagen maßgebend war, was auch durch den Verlauf der $F - w_2$ Kurve bestätigt wird.

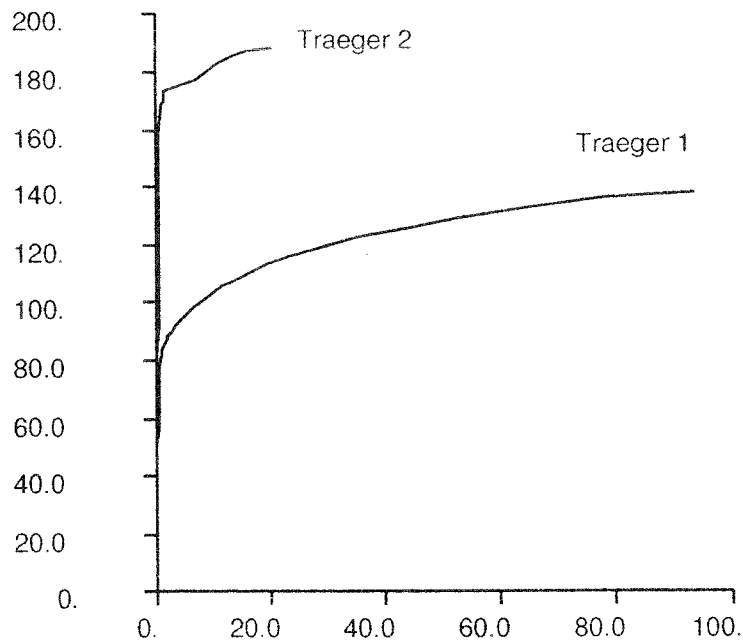


Bild 10 Kraft P [kN] über Durchbiegung w_2 [mm] (FEM-Berechnung)

Auch die Durchlaufwirkung zweifeldriger Kastenträger mit schlanken Stegen wird maßgeblich durch die Stegdicke beeinflusst, was aus Bild 11 hervorgeht. Wie auch andere Untersuchungen [8, 9] gezeigt haben, bleibt der Durchlaufcharakter des Tragwerkes mit zunehmender Stegdicke wesentlich länger erhalten.

Für den 2. Träger bleibt der Wert $\alpha = 1,76$ bis zum Übergang in den überkritischen Tragzustand bei ca. 143 kN konstant. Danach wird die Durchlaufwirkung schnell abgebaut und fällt bis zum Erreichen der Traglast auf einen Wert $\alpha = 1,02$ ab. Beim Erreichen der Traglast verhält sich auch dieser Kastenträger wie zwei Einfeldträger.

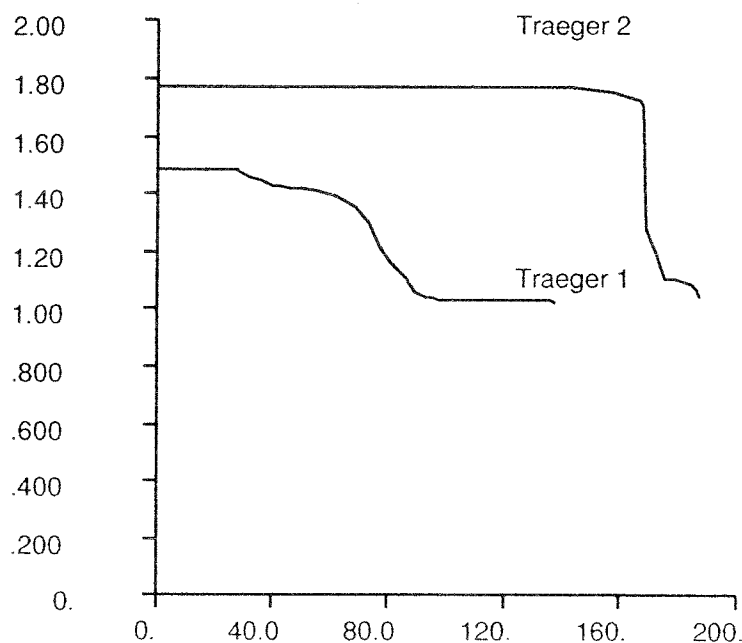


Bild 11 Verhältnis der Auflagerkräfte über Kraft P, (FEM-Berechnung)

An zwei Beispielen wurde gezeigt, daß die Ermittlung der Beanspruchungen nach der technischen Biegelehre für durchlaufende Kastenträger mit dünnwandigen Stegen nicht zutreffend ist. Eine Verbesserung wird erzielt, wenn der Einfluß der Schubverformungen bei der Schnittkraftermittlung berücksichtigt wird. Bei der Inanspruchnahme überkritischer Tragreserven für die Bemessung [9] wird empfohlen, die Durchlaufträger feldweise als Einfeldträger zu behandeln.

6 Literatur

- [1] **Hibbit; Karlson; Sorensen:** ABAQUS User's Manual. Version 5.3, 1993
- [2] **Krautwald, P:** Bestimmung des Tragverhaltens ausgewählter Durchlaufträger mit ausgesteiften, schlanken Stegen. Diplomarbeit. TU Braunschweig, 1991
- [3] **Wendehorst:** Bautechnische Zahlentafeln. Stuttgart, 25. Aufl., 1991
- [4] **Scheer, J.; Pasternak, H.:** Zum Nachweis von Vollwandträgern mit dünnen Stegen und Quer- sowie auch Längssteifen in Regelwerken. Bauingenieur 64 (1989), S. 121-133
- [5] **Scheer, J.; Plumeyer, K.:** Zu Verformungen stählerner Biegeträger aus Querkräften. Bauingenieur 63 (1988), S. 475-478
- [6] **Palme, E:** Der Querkrafteinfluß bei der Ermittlung von Verformungen an Stahlbauteilen. Berichte aus der Thyssenforschung, 5. (1973), H. 1, S. 12-16
- [7] **Pasternak, H.; Chroscielewski, J.:** Zur Beurteilung des Tragverhaltens von Bauteilen mit schlanken ausgesteiften Stegen mit Hilfe der FEM. Bauingenieur 68 (1993), S. 277-289
- [8] **Scheer, J.; Pasternak, H.:** Behaviour of continuous plate girders with slender, transversely stiffened webs. Proceedings of the Third Pacific Structural Steel Conference, 1992, Tokio, pp. 503-506
- [9] **Deutscher Ausschuß für Stahlbau:** DAST-Richtlinie 015. Träger mit schlanken Stegen. Stahlbau-Verlagsgesellschaft, 1990



Prof. Dr.-Ing. habil. H. Pasternak



Dipl.-Ing. S. Schilling

Cottbus, den 29.04.1994

T 2653

"Investigations on the behaviour of welded double-span box girders with slender webs"

- Summary -

Experimental and finite element investigations on continuous box girders have been performed. They have shown that in case of high slenderness "post-buckling hinges" develop at the intermediate supports which prevent the girder from continuity.

The investigations suggest that the design of continuous girders with slender webs on the basis of elastic analysis (class IV according to EC3) may be either unsafe or uneconomically.