

# Tragverhalten von Durchlaufträgern mit schlanken, ausgesteiften Stegen

**T 2749**

T 2749

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 reprotechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprotechnischen 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](mailto:irb@irb.fraunhofer.de)

[www.baufachinformation.de](http://www.baufachinformation.de)

**Brandenburgische Technische Universität**

**Lehrstuhl für Stahlbau**

Abschlußbericht

Tragverhalten von Durchlaufträgern  
mit schlanken, ausgesteiften Stegen

Auftraggeber: Deutsches Institut für Bautechnik  
Kolonnenstraße 30  
D-10829 Berlin  
Az.: IV 1-5-759 / 94

Cottbus 1996

### *Zusammenfassung*

Es wurden 10 zweifeldrige geschweißte I-Träger in 2 Serien untersucht. Die Träger unterschieden sich vom Verhältnis Steghöhe zu Stegdicke sowie Gurtbreite zu Gurtstärke. Gegenstand der ersten fünf Versuche (Serie 1) waren die Träger mit 4 Stegfeldern, während die in der zweiten Serie untersuchten Träger mit acht Stegfeldern doppelt so lang waren. Die Versuche haben gezeigt, daß die Durchlaufwirkung für Träger mit schlanken Stegen mit zunehmender Belastung verlorengeht.

Das Verhältnis der mittleren zu äußeren Auflagerkraft im Versuch war für alle kurzen Träger kleiner als das nach der Balkentheorie mit Berücksichtigung der Querkraftverformungen berechnete.

Aus der Versuchsauswertung ergab sich, daß die Ermittlung der Schnittkräfte nach dem "Fachwerkmodell" erfolgen könnte.

Die Abweichung zwischen experimentellen und nach DASt-Ri 015 bestimmten Werten der Grenzquerkraft (bei nach der Balkentheorie ermittelten Schnittkräften) betrug bis zu 30% bei voller Zugfeldwirkung ( $\eta = 1,0$ ). Beim Biegemomenten Tragfähigkeitsnachweis sollte der effektive Querschnitt des Steges berücksichtigt werden.

Es deutete sich an, daß die Bemessung von Konstruktionen dieser Art nach der Balkentheorie unsicher ist.

### *Summary*

Experimental investigations on continuous plate girders have been performed. The parameter that was deliberately varied in two series of the tests was the width - to - thickness ratio of the web ( $b_w / t_w$ ) and of the flange ( $b_f / t_f$ ). The girders of the second series were doubly long than the girders of the first series. The tests have shown, that in case of the girders with shear collapse mechanism, the continuity of the girders disappears gradually together with the load increasing.

The ratio of the reactions at the intermediate and end support ( $R_m / R_e$ ) from the tests was for all short girders smaller than according to beam theory (considering shear deformations).

The investigations suggest that the distribution of the reactions could be assumed from the "truss model".

From the comparison of the test results with the theoretical calculation according to DASt-Ri 015 it can be seen that the degree of underestimation is up to 30 per cent for the girders with shear collapse mechanism.

In case of the girders with thin flanges it is proposed that by the calculation of the ultimate bending moment should be taken into consideration the effective section of the web.

It has been found from the tests that the design of continuous girders with slender webs on the basis of elastic analysis may be either unsafe or uneconomically.

## 1 Zielstellung

Das Ziel dieses Forschungsvorhabens bestand darin, experimentell zu untersuchen, wie sich Durchlaufträger mit schlanken Stegen unter zunehmender Beanspruchung verhalten.

Von besonderem Interesse war das Verhältnis der mittleren zur äußeren Auflagerkraft als Kriterium der Durchlaufwirkung.

## 2 Versuchsplanung und -aufbau

Entsprechend der Leistungsbeschreibung zum Forschungsvorschlag "Durchlaufträger" sind zehn Versuche an geschweißten, zweifeldrigen I-Träger durchgeführt worden.

Gegenstand der ersten fünf Versuche (Serie 1) waren die Träger mit 4 Stegfeldern, während die in der Serie 2 untersuchten Träger mit acht Stegfeldern doppelt so lang waren. Das statische System stellt das Bild 1 dar.

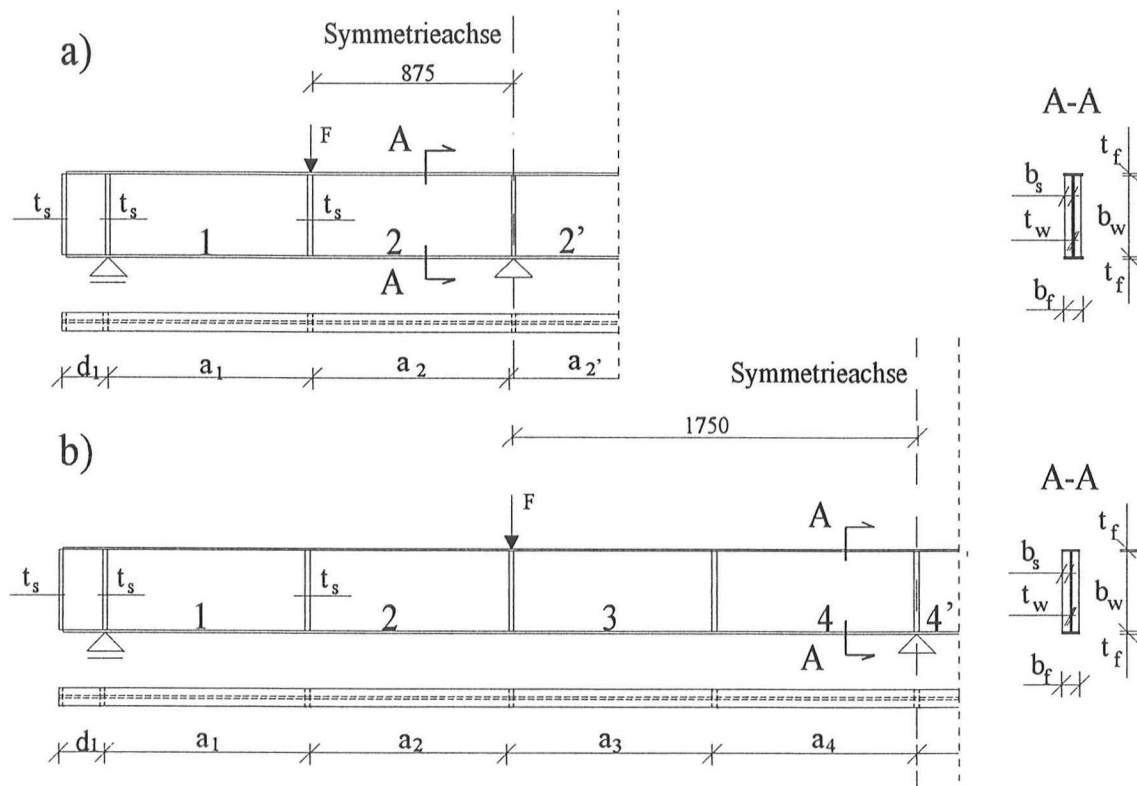


Bild 1a, b Abmessungen der Versuchsträger Serie 1 und Serie 2

Durch die Anordnung der beidseitigen Querschotte wurde der Steg in vier bzw. acht rechteckige Teilfelder mit einem typischen Seitenverhältnis von  $\alpha = a / b_w = 2,5$  aufgeteilt. Um das Versagen des Trägers am äußeren Auflager zu vermeiden, wurde ein ausreichend großer Überstand  $d$  vorgesehen. Aus Tab. 1 gehen die Abmessungen aller Bleche des Versuchskörpers hervor.

Die Werkstoffkennwerte wurden im Zugversuch nach DIN 50125 bestimmt. Berechnete Mittelwerte der mechanischen Eigenschaften der verwendeten Trägerstähle sind in der Tab. 2 zusammengefasst. Für die dünnwandigen Querschnittsteile konnte keine ausgeprägte

Streckgrenze bestimmt werden, so daß den Proben kein eindeutiger Elastizitätsmodul als Tangentenanstieg im linearen Bereich zugeordnet werden kann. Deshalb wurden diese für die weitere Berechnung nach DIN 18800 Teil 1 angenommen.

Wegen der Dünnwandigkeit der Bleche waren die technologischen Vorverformungen nicht zu vermeiden. Trotz des schrittweisen Schweißprozesses, mit Pausen für die Abkühlung der Naht und der verschweißten Elemente, kam es infolge des Fertigungsprozesses zu großen Deformationen von Gurt und Steg. Diese Imperfektionen wurden mit Hilfe eines Nivellierinstrumentes gemessen. Die größte Vorbeule im Steg des Trägers T1 hatte eine Amplitude von 7,2 mm.

Tab. 1 Abmessungen der Versuchsträger in mm

Träger	SERIE 1					SERIE 2				
	T1	T2	T3	T4	T5	T11	T22	T33	T44	T55
$b_f$	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80
$t_f$	1,85	3,00	10,00	10,00	10,00	1,98	3,00	10,00	10,00	10,00
$b_w$	350	350	350	350	350	350	350	350	350	350
$t_w$	1,85	1,85	1,85	1,50	1,00	1,98	1,98	1,98	1,50	1,00
$b_s$	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
$t_s$	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00
$d_1$	206	203	204	201	205	204	204	206	205	216
$d_1'$	204	206	203	201	205	206	204	203	203	216
$a_1$	874	875	875	874	874	873	876	873	872	874
$a_2$	874	872	875	876	874	873	875	873	875	873
$a_3$	-	-	-	-	-	873	876	875	874	875
$a_4$	-	-	-	-	-	876	874	878	872	870
$a_4'$	-	-	-	-	-	874	877	874	874	874
$a_3'$	-	-	-	-	-	873	874	874	875	873
$a_2'$	874	874	875	879	875	874	875	874	874	874
$a_1'$	874	873	875	876	875	873	874	876	874	875

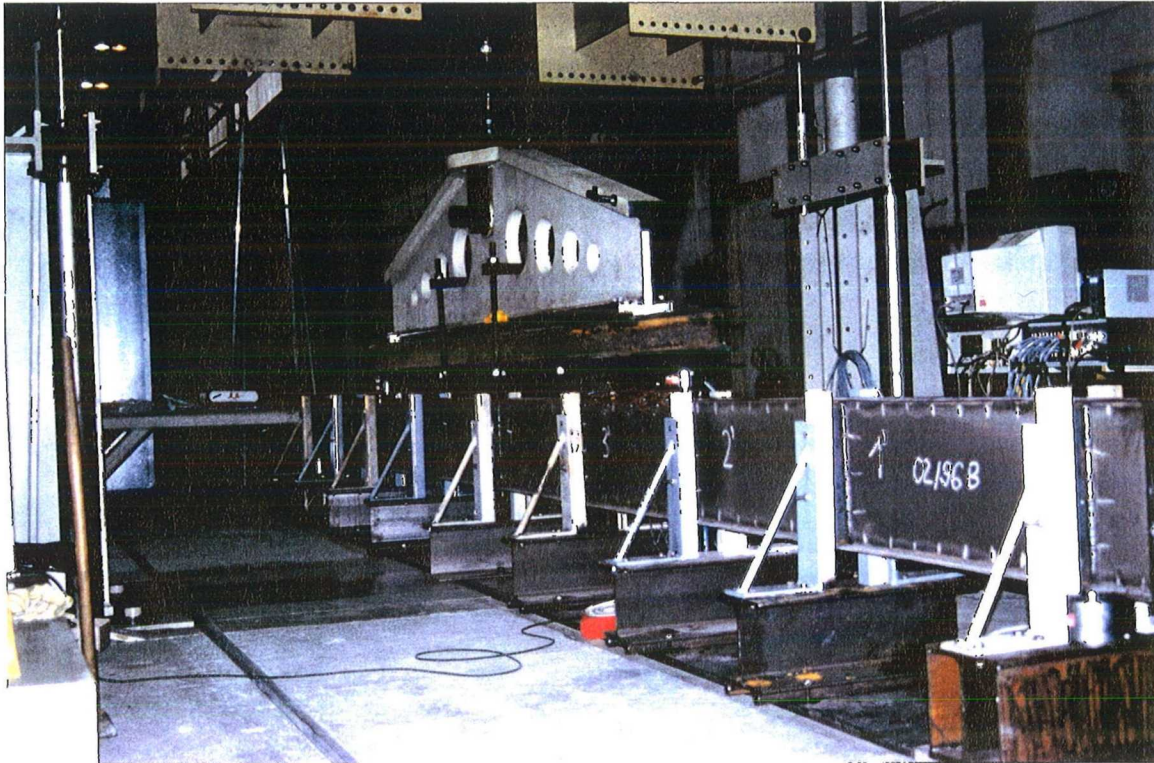


Bild 2 Versuchsaufbau für Träger T22

Tab. 2 Materialkennwerte

Träger	Steg			Gurte			Steifen		
	E-Modul [N/mm <sup>2</sup> ]	R <sub>p0,2</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	R <sub>m</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	E-Modul [N/mm <sup>2</sup> ]	R <sub>p0,2</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	R <sub>m</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	E-Modul [N/mm <sup>2</sup> ]	R <sub>p0,2</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	R <sub>m</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]
<b>T1</b>	201300	253	326	201300	253	326	204000	289	447
<b>T2</b>	201300	253	326	204300	248	410	204000	289	447
<b>T3</b>	201300	253	326	204000	289	447	204000	289	447
<b>T4</b>	210000	323	405	204000	289	447	204000	289	447
<b>T5</b>	210000	281	368	204000	289	447	204000	289	447
<b>T11</b>	191300	294	335	191300	294	335	207100	282	439
<b>T22</b>	191300	294	335	175200	185	351	207100	282	439
<b>T33</b>	191300	294	335	207100	282	439	207100	282	439
<b>T44</b>	210000	169	310	207100	282	439	207100	282	439
<b>T55</b>	210000	261	359	207100	282	439	207100	282	439

Die für die Untersuchungen erforderliche Messung der Stützkräfte erfolgte am linken und am rechten Auflager. Dazu wurden an diesen Stellen zwei 500-kN-Kraftmeßdosen (Typ C2, Hottinger Baldwin Meßtechnik HBM, Darmstadt) verwendet. Die Belastung wurde mittels einer Prüfmaschine mit einer Traglast von 1000 kN aufgebracht und über eine Verteilungstraverse als zwei Einzellasten zugewiesen. An den Lastangriffspunkten der Traverse wurden zwei 200-kN-Kraftmeßdosen (Typ C2, Hottinger Baldwin Meßtechnik HBM, Darmstadt) angebracht. Um die Lastzentrierung zu gewährleisten und die Reibungseinflüsse zu reduzieren, wurden jeweils zwischen Kraftmeßdosen und der Traverse zwei Rollen auf einem Blech (Bl 100x100x20-St 37) angeordnet. Zur Gewährleistung der horizontalen Verschieblichkeit wurden unter den Endauflagern (gewalzte I-Profile) ebenfalls Rollen angebracht.

Das Drillknicken des Trägers während des Versuchs wurde durch rahmenartige seitliche Abstützungen an den Auflager- und Zwischensteifen verhindert.

An den Lasteinleitungsstellen auf der Unterseite des Obergurtes wurden Wegaufnehmer (Typ IWT 402, Meßbereich 100 mm, Hottinger Baldwin Meßtechnik HBM, Darmstadt) angebracht. Das Materialverhalten des Trägers wurde über die Messung der Dehnungen auf beiden Oberflächen des Steges sowie den Ober- und Untergurten mit Hilfe von Dehnungsmeßstreifen (Typ RY 41-6/120 (Steg), Typ LY 11-6/350 (Gurte) Hottinger Baldwin Meßtechnik HBM, Darmstadt) erfaßt. Alle Meßeinrichtungen waren zur Datenerfassung an das Digitale Meßverstärkersystem DMCplus angeschlossen.

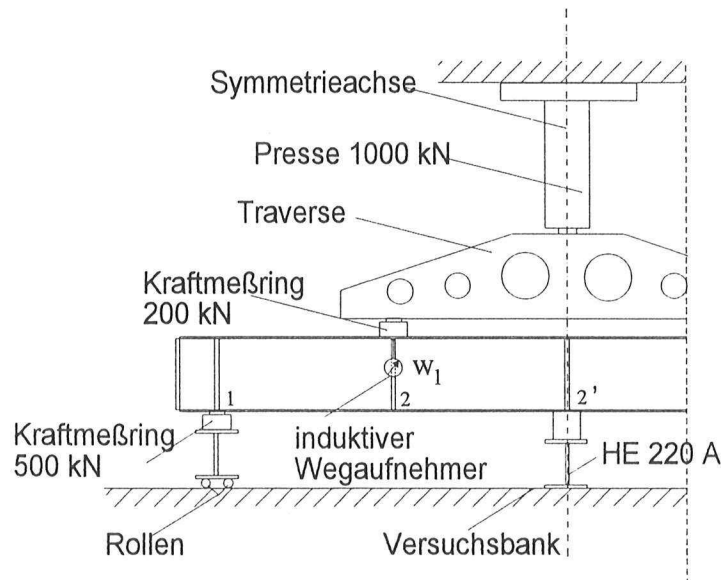


Bild 3 Skizze des Versuchsaufbaus für die Träger der Serie 1

Im Rahmen der Zusammenarbeit zwischen den Lehrstühlen für Stahlbau und für Vermessungswesen an der BTU Cottbus wurde zusätzlich bei der Untersuchung des Trägers T3 der Deformationszustand eines ausgewählten Stegfeldes mittels photogrammetrischer Methode bestimmt. Der Versuchsaufbau ist auf dem Bild 4 zu sehen.



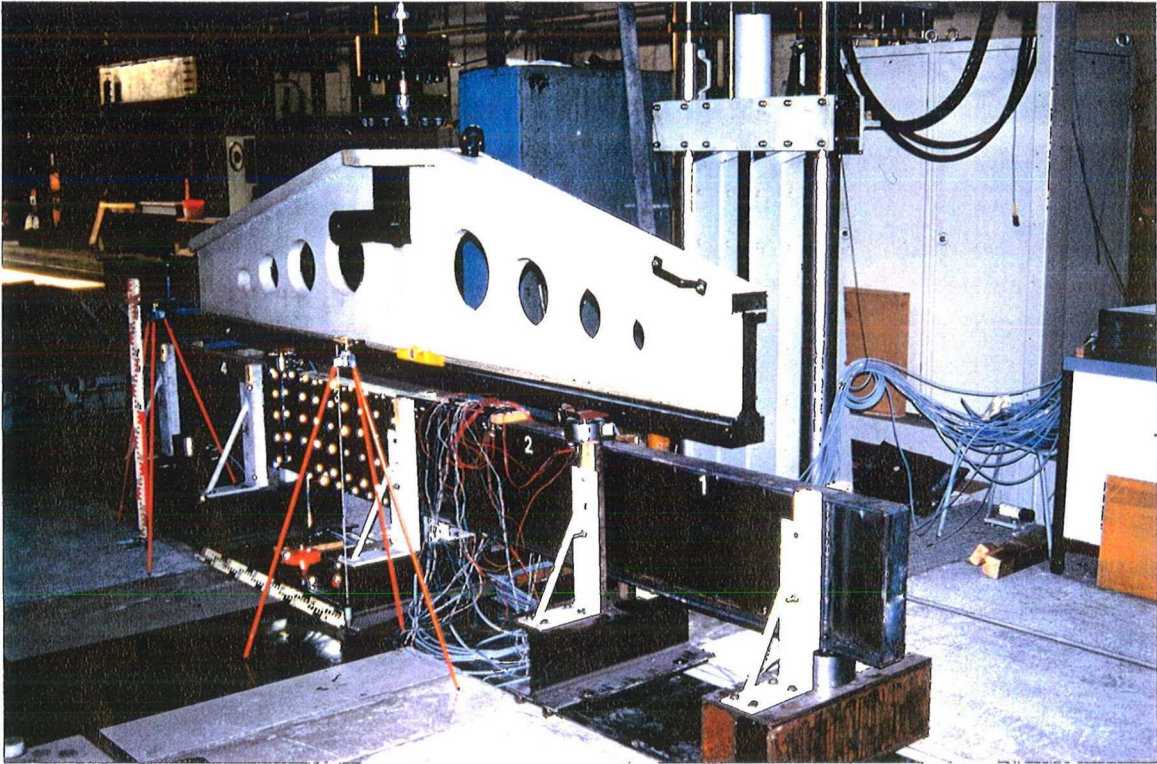


Bild 4 Versuchsaufbau für Träger T3

Der Steg wurde einseitig mit speziellen Meßmarken diskretisiert, die auch am Rand der beiden Gurte befestigt worden sind. Bei bestimmten Belastungsstufen wurde der Träger von sechs verschiedenen Stellen fotografiert. Nach der Anfertigung der Aufnahmen und der Schaffung eines festen Koordinatenrahmens wurde mit Hilfe entsprechender Software der Deformationszustand bestimmt.

### *3 Versuchsdurchführung und -ergebnisse*

#### *3.1 Art der Lasteinleitung*

Die Traglastversuche wurden weggesteuert gefahren. Die Laststeigerung erfolgte über eine schrittweise Erhöhung des Zylinderweges der Prüfmaschine.

Es war zu beobachten, daß während des Lastzuwachses systemeigene Einspielzeiten auftraten, die auf innere Schnittkraftumlagerungen zurückgeführt werden konnten. Diese Einspielzeiten benennen den Zeitraum vom Eintrag des Weginkrementes bis zum konstant bleiben der davon abhängigen Pressenkraft. Diese Anpassungsphasen verlängerten sich mit zunehmender Versuchsdauer.

Über die Hilfstraverse werden zwei gleiche Einzelkräfte  $F$  eingeleitet. Dies ist auf dem Bild 5 dargestellt.

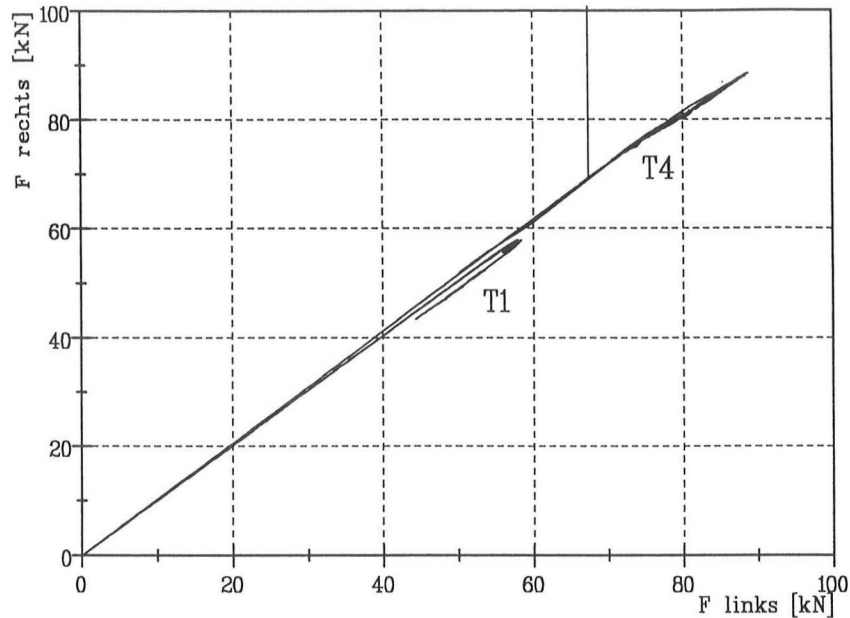


Bild 5 Einzellast-links über Einzellast-rechts

### 3.2 Die Träger der Serie 1

Das Tragverhalten der Träger mit dicken Gurten (T3, T4, T5) kann hinsichtlich der Versuche als qualitativ ähnlich eingeschätzt werden..

Die ersten Stegausbeulungen wurden in den Feldern neben dem mittleren Auflager beobachtet, anschließend aber auch in den Endfeldern. Mit zunehmender Belastung wandelten sich die Beulen in der Mitte der Träger in deutlich sichtbare Zugfelder um (Bild 6). Bei weiterer Laststeigerung kam es infolge des Steifigkeitsverlustes der Stegfelder neben dem mittleren Auflager zu einer Schnittkraftumlagerung in Richtung der äußeren Auflager, und es bildeten sich auch in den Endfeldern des Steges typische Zugfelder aus (Bild 7). Der Neigungswinkel der Zugfelddiagonalen war gleich dem der Felddiagonalen. Das Versagen der Versuchsträger stellte sich schließlich durch die Ausbildung von Fließgelenken in Ober- und Untergurt ein. Die Ursache für die Fließgelenkausbildung lag darin, daß sich die Zugfelder an die Gurte anhängen. In der Tabelle 3 wurden die Lastwerte gekennzeichnet, bei denen die ersten sichtbaren Stegbeulen beobachtet worden sind.

Aus dem Vergleich der Last-Verformungsanalyse ist der Versagensmechanismus einfach zu erkennen. Die Kurven (Bild 9) für alle Träger außer des Trägers T1 lassen sich in drei Abschnitte einteilen. Bis zur Beullast verlaufen sie geradlinig. Danach ist der Zuwachs der Durchbiegung größer als der der Beanspruchung. Nach dem Erreichen der Traglast bildet sich ein Lastplateau, wobei die Durchbiegung bei minimalem Lastabfall zunimmt. Diese deutlichen horizontalen Äste unterstreichen die überkritischen Tragreserven dieser Träger.

Für ihre Bemessung ist der den Zugfeldmodellen zugrunde liegende Tragmechanismus zutreffend.

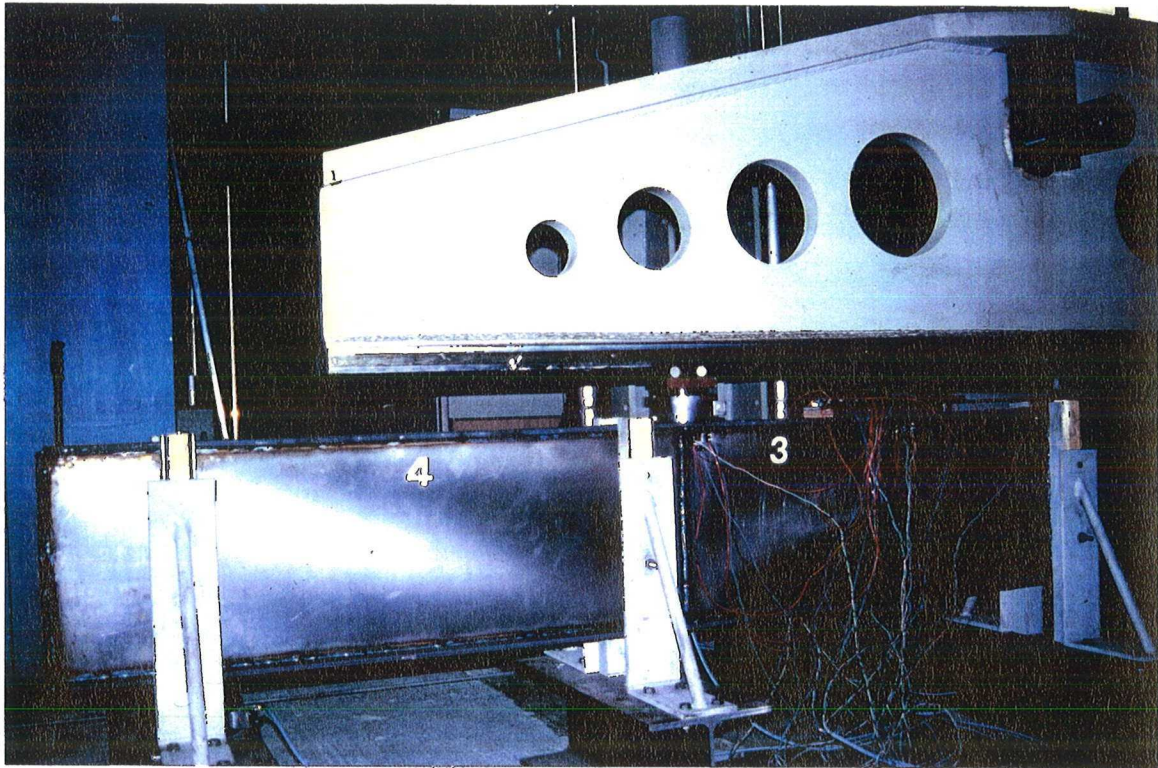


Bild 6 Träger T5 unter Pressenkraft  $2F = 75 \text{ kN}$

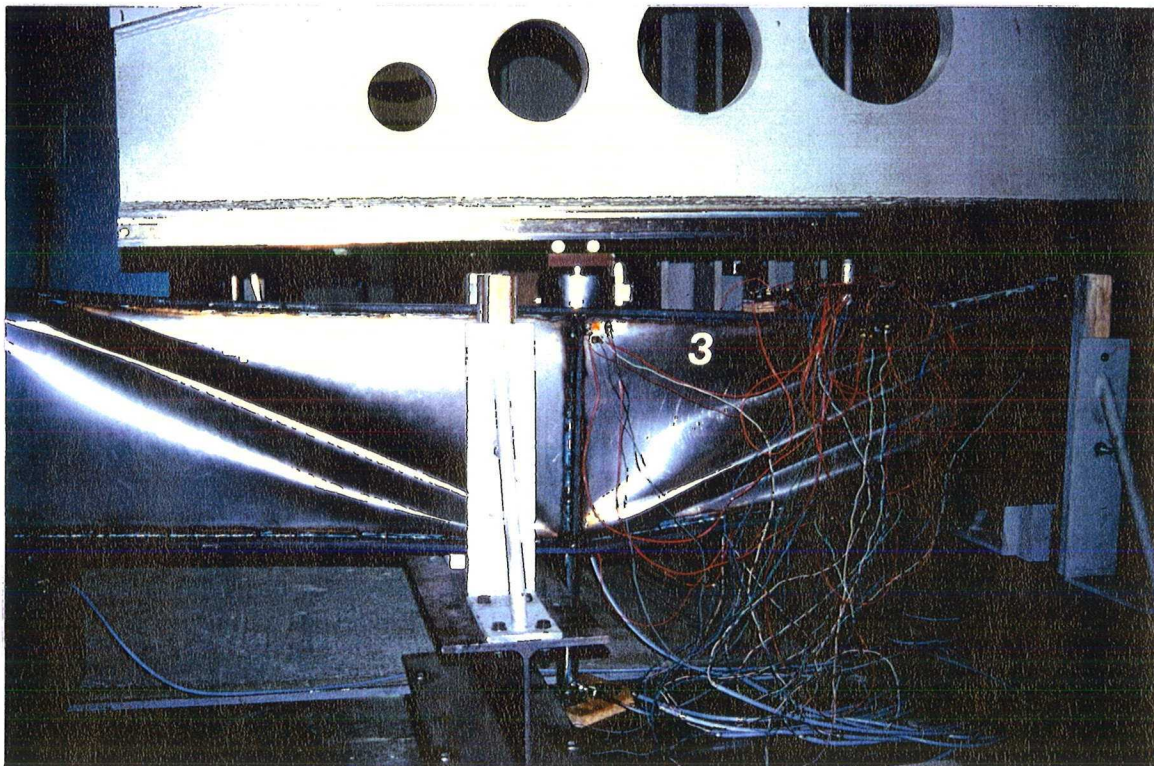


Bild 7 Träger T5 unter Pressenkraft  $2F = 80 \text{ kN}$

Tab. 3 Einzellastwerte, bei denen die ersten Stegauseinandersetzungen beobachtet wurden

	TRÄGER				
	T1	T2	T3	T4	T5
Beullast F [kN]	25	37	68	48	28

Die Kurve für den Träger T1 hat keinen horizontalen Ast. Die Durchbiegung fällt gleichzeitig mit der Belastung sofort nach dem Erreichen der Traglast ab. Die Ursache dafür liegt darin, daß vor Fließgelenkausbildung infolge der mit zunehmender Beanspruchung wachsenden Normalspannungen die Biegemomententragfähigkeit überschritten wird. Trotz der im Steg sichtbaren Beulen (Bild 8) war offensichtlich für den Träger T1 das Versagen des Druckgurtes maßgebend.

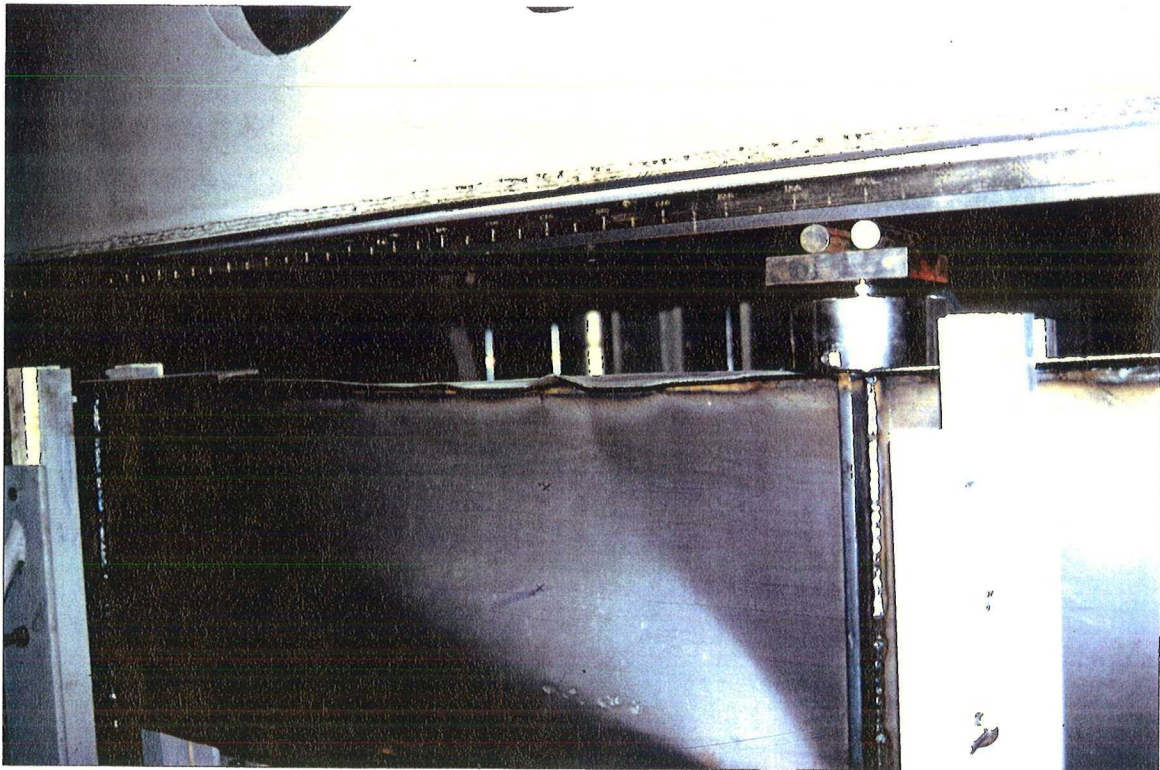


Bild 8 Ausgebeulter Gurt des Trägers T1 im Traglastzustand

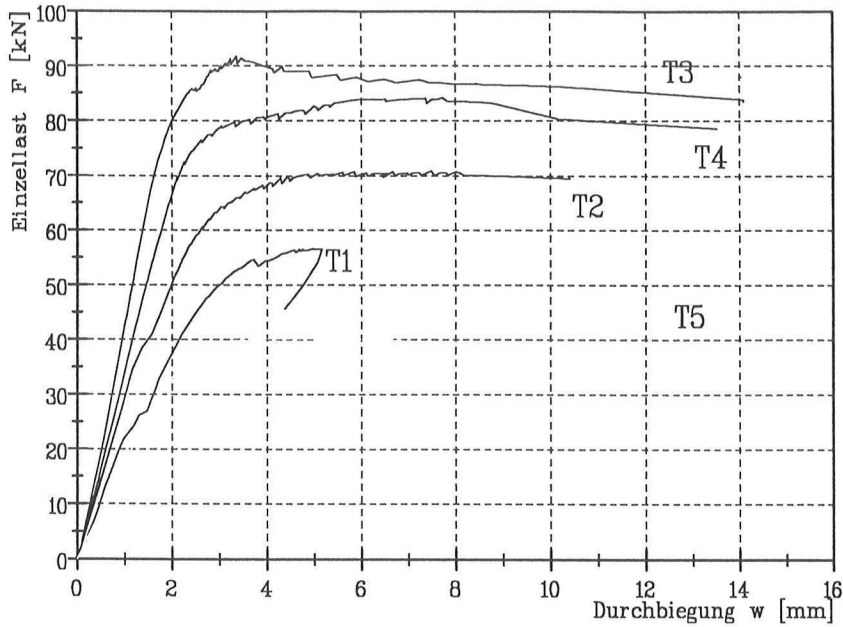


Bild 9 Einzellast über Durchbiegung für die Träger der Serie 1

In Bild 10 ist das Verhältnis der mittleren zur äußeren Auflagerkraft  $\alpha = R_m / R_e$  in Abhängigkeit von der Einzellast  $F$  dargestellt. Weil die Messung der Auflagerkraft in der Mitte des Trägers im Versuch nicht vorgesehen war, wird die Reaktionskraft  $R_m$  aus der Gleichgewichtsbedingung der Vertikalkräfte berechnet:  $R_m = 2F - 2R_e$  ( $R_m$  - Reaktionskraft am mittigen Auflager,  $R_e$  - Reaktionskraft am Endauflager). Über den Koeffizienten  $\alpha$  läßt sich beobachten, wie sich die Durchlaufefigenschaften des Trägers mit zunehmender Beanspruchung ändern.

Im unterkritischen Zustand haben alle Kurven einen waagerechten Bereich. Danach vermindern sich die Werte von  $\alpha$  für sämtliche Träger außer des Trägers T1. Ein Abnehmen von  $\alpha$  im Zusammenhang mit wachsender Belastung weist darauf hin, daß die Durchlaufwirkung verlorengeht. Über ähnliche Ergebnisse wurde in [1] berichtet.

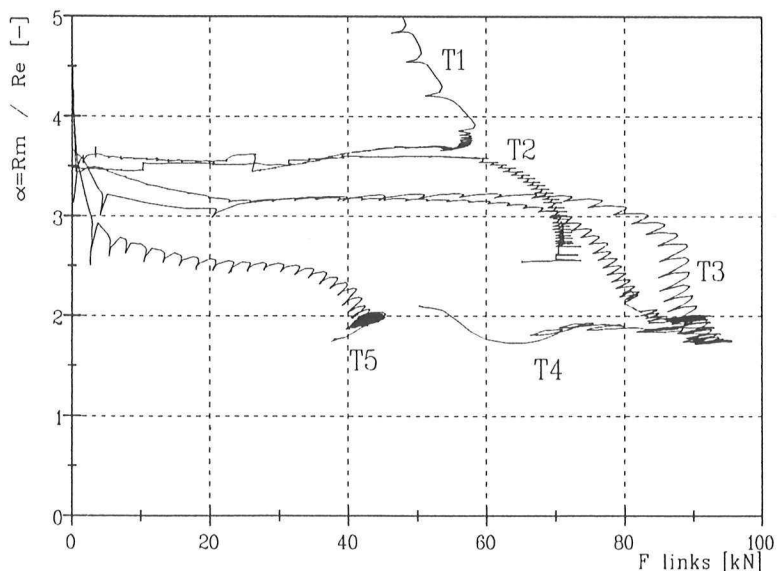


Bild 10 Verhältnis Auflagerkräfte über Einzellast für die Träger der Serie 1

Aus der Tabelle 4 gehen die Werte von  $\alpha$ , berechnet nach der Balkentheorie mit und ohne Berücksichtigung der Querkraftverformungen und aus den Versuchsergebnissen bestimmt, hervor. Für die Träger mit "kräftigen" Gurten (T1, T2, T3) sind die Endwerte  $\alpha$  im Versuch gleich und betragen 1,8. Nur der Träger T1 behält seine Durchlaufwirkung bis zum Erreichen der Traglast.

Alle Versuchswerte weichen wesentlich von den theoretischen  $\alpha$ -Werten ab.

Tab. 4 Theoretische und experimentelle Werte des Verhältnisses der Auflagerkräfte  $R_m / R_o$  für die Träger der Serie 1

TRÄGER	FAKTOR $\alpha$		
	Balkentheorie ohne Querkraftverformung	Balkentheorie mit Querkraftverformung	VERSUCH $\alpha$ bei der Traglast
T 1	4,4	4,2	3,6
T 2	4,4	4,1	2,7
T 3	4,4	3,8	1,8
T 4	4,4	3,7	1,8
T 5	4,4	3,5	1,8

Aus den Koordinaten der photogrammetrischen Auswertung wurden Punktverschiebungen des Druckgurtes und des Steges in einem Stegsegment des Trägers T3 berechnet. Im Bild 11 wurde die Durchbiegung des Obergurtes dargestellt. Auf der Ordinatenachse sind die Punkte des Obergurtes aufgetragen, die Abszissenachse enthält die Deformationen in Millimetern. Die größte Durchbiegung entspricht dem Punkt, in dem das Zugfeld sich an dem Druckgurt anhängt. Der rechnerische Fließgelenkabstand, bezeichnet nach DAST-Ri 015 als  $c_1$ , beläuft sich hier auf 291 mm, im Unterschied zu gemessenen 437 mm.

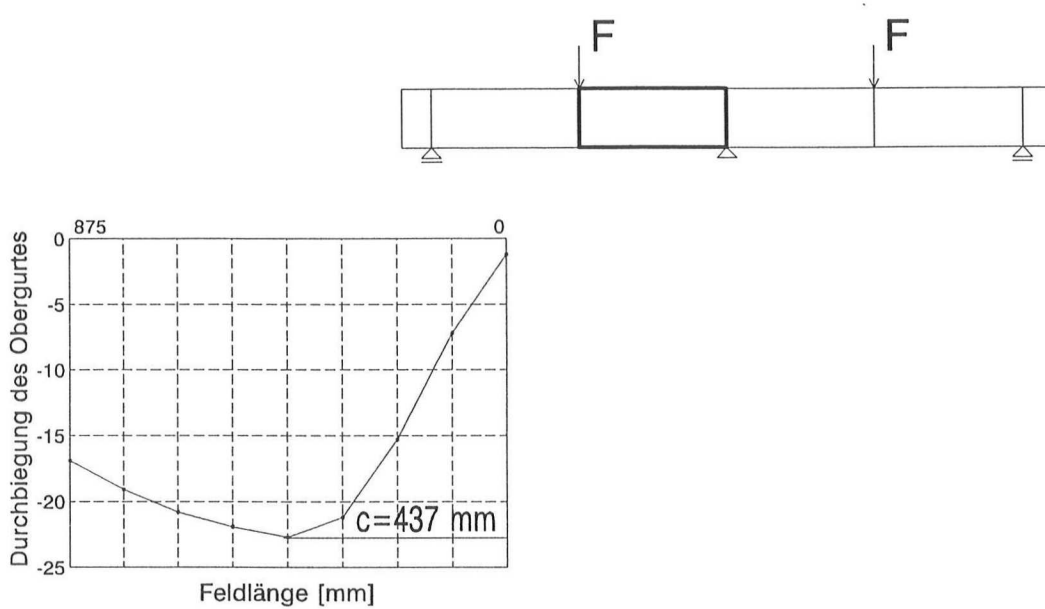


Bild 11 Vertikale Deformationen des Obergurtes des Trägers T3 bei der Einzellast  $F = 88$  kN

Mit Hilfe des Programmsystems MODELL wurde ein deformiertes Stegfeld als "Drahtmodell" dargestellt. Die deformierte Fläche entstand durch die Interpolation zwischen den Deformationen in den Netzpunkten. Die größte Verschiebung in der Stegmitte im Traglastzustand beträgt ca. 32 mm bei einer Einzellast von  $F=88$  kN.

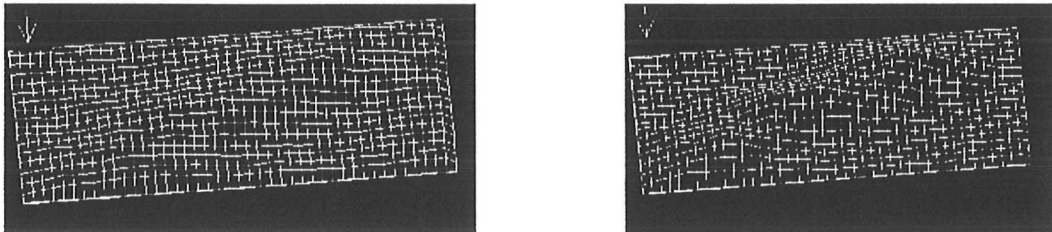


Bild 12 Stegoberfläche des ausgewählten Feldes des Trägers T3 bei der Einzellast  $F=90$  kN und  $F=92$  kN

### 3.3 Die Träger der Serie 2

Ähnlich wie bei den Trägern der Serie 1 traten auch hier unterschiedliche Versagensformen auf. Typisch für die Träger mit kräftigen Gurten und schlanken Stegen - T33, T44 und T55 - war die Ausbildung von der Zugfeldern. Zunächst entstanden fast gleichzeitig die Stegauseinandersetzungen in den Segmenten 3, 4, 4' und 3', danach auch in den äußeren Feldern. Mit weiterer Laststeigerung bildeten sich gut erkennbare Zugbänder in den Stegfeldern zwischen den Lasteinleitungspunkten. Zum Versagen der Versuchsträger kam es infolge der Ausbildung von Fließgelenken in den Gurten im Feld 3 bzw. 3'. Die unsymmetrische Versagensfigur, die

sich durch das Entstehen der Fließgelenke nur in einer Trägerhälfte zeigte, wurde durch vorhandene Vorverformungen in den Stegen verursacht.

Die Lastverformungskurven (Bild 13) für die Träger T11 und T22 haben keinen horizontalen Ast, was auf einen anderen Versagensmechanismus hinweist. Bei der Pressenkraft  $2F = 46 \text{ kN}$  erschienen globale Beulen in allen Stegfeldern des Trägers T11. Danach kam es zur allmählichen Verdrehung der Gurte in der Nähe der Lasteinleitungspunkte in den Feldern 2 und 3 sowie 2' und 3'. Das Versagen des Versuchsträgers T11 stellte sich schließlich durch Biegedrillknicken in Zusammenhang mit örtlichen Beulen in Ober- und Untergurt ein (Bild 14). Der Versagensmechanismus für den Träger T22 war gleichartig, wobei im Feld Nr. 3 ein schwaches Zugband zu sehen ist.

Tab. 5 Einzellastwerte, bei denen die ersten Stegbeulungen beobachtet wurden

	TRÄGER				
	T11	T22	T33	T44	T55
Beullast F [kN]	23	35	72	33	14

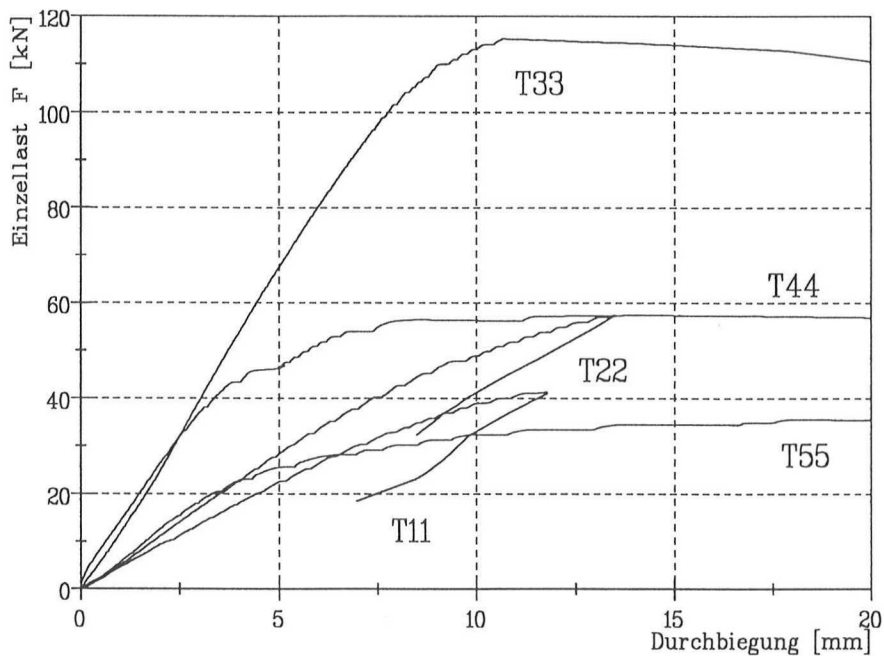


Bild 13 Einzellast über Durchbiegung für die Träger der Serie 2



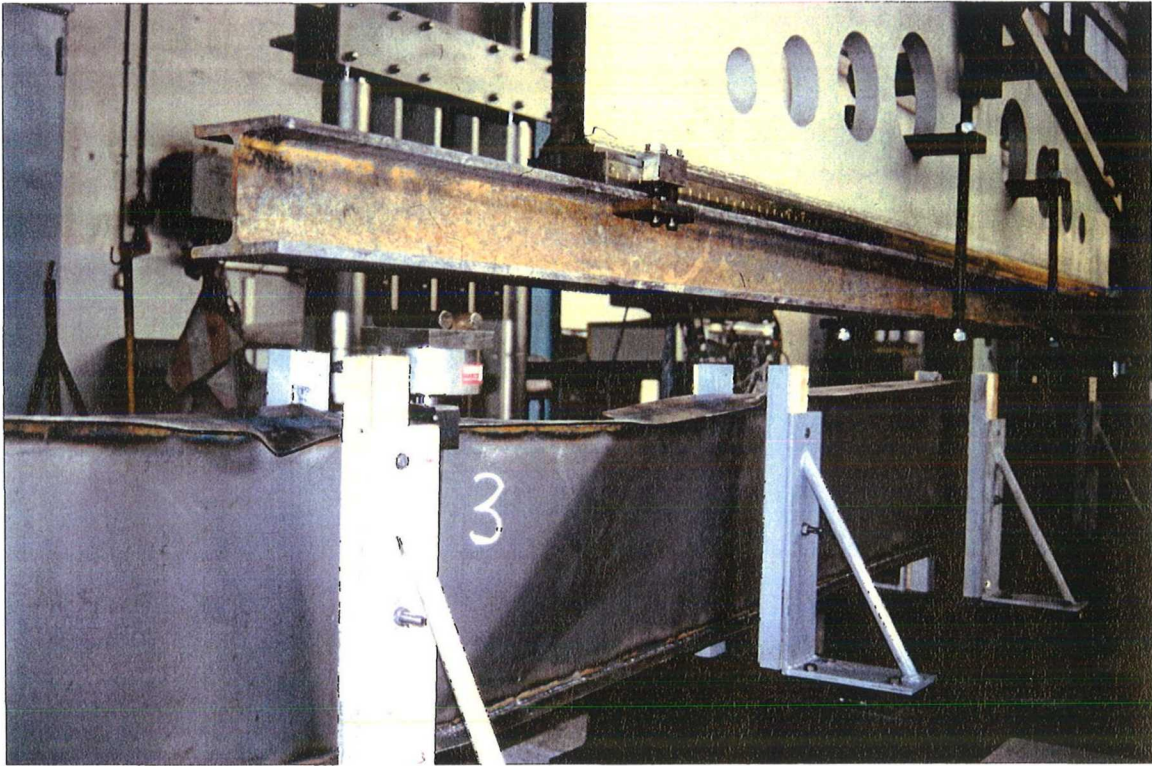


Bild 14 Träger T11 im Traglastzustand

In Bild 15 wird das Verhältnis der mittleren zur äußeren Auflagerkraft  $\alpha = R_m / R_e$  über der Einzellast  $F$  für die Träger der Serie 2 verglichen. Die Ergebnisse unterscheiden sich deutlich von denen für die Träger der Serie 1. Die Werte  $\alpha$  für die Träger T11 und T22 sind bis zum Erreichen der Traglast konstant auf dem Niveau von ca. 4,25. Die Kurve für den Träger T33 ist bis zum Wert von der Einzellast  $F = 100$  kN relativ horizontal, anschließend fallen die Werte  $\alpha$  auf 3,75. Die Kurven für die Träger T44 und T55 unterscheiden sich den Anfangswerten des Verhältnisses der Reaktionskräfte. Im Traglastzustand sind die Werte  $\alpha$  für beide Träger fast gleich.

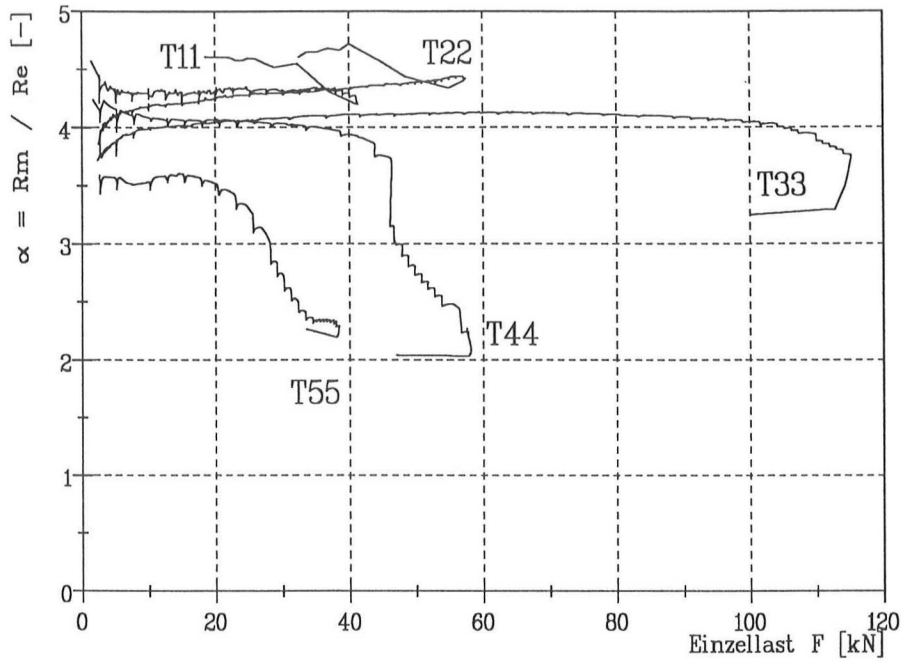


Bild 15 Verhältnis Auflagerkräfte über Einzellast für die Träger der Serie 2

In der Tabelle 6 sind die Werte  $\alpha$  nach der Balkentheorie mit und ohne Berücksichtigung der Querkraftverformungen sowie aus den Versuchen dargestellt.

Tab. 6 Theoretische und experimentelle Werte des Verhältnisses der Auflagerkräfte  $R_m / R_e$  für die Träger der Serie 2

TRÄGER	FAKTOR $\alpha$		
	Balkentheorie ohne Querkraftverformung	Balkentheorie mit Querkraftverformung	VERSUCH $\alpha$ bei der Traglast
T 11	4,4	4,3	4,25
T 22	4,4	4,3	4,25
T 33	4,4	4,2	3,75
T 44	4,4	4,2	2,10
T 55	4,4	4,1	2,10

Es ist bemerkenswert, daß die Werte des Quotienten  $\alpha$  deutlich von den Werten in der Serie 2 abweichen. Die Anfangswerte  $\alpha$  sind bis zum deutlichen Knickpunkt der Kurve konstant und stimmen gut mit den theoretischen Werten nach der Balkentheorie mit Berücksichtigung der Querkraftverformungen (Tab. 6) überein. Die Endwerte  $\alpha$  fallen in keinem Fall unter 2,0, was zu dem Schluß führen könnte, daß die Träger im überkritischen Tragzustand wegen der abnehmenden Steifigkeit im Bereich des mittleren Auflagers sukzessiv in ein System zweier Einfeldträger übergehen.

#### 4 Berechnung nach DAST-Richtlinie 015

Die Bestimmung der Traglast entspricht der Festlegung der DAST-Richtlinie 015 [2], daß die Biegemomente den Gurten und die Querkräfte dem Steg zugewiesen werden. Die in der Tab. 6 dargestellten Werte wurden mit dem Tragsicherheitsfaktor  $\gamma_M = 1,0$  und dem Koeffizienten  $\eta = 1,0$  (in DAST-Ri  $\eta = 0,85$ ) berechnet.

Die Werte der Querkrafttragfähigkeit in der Spalte 5 wurden mit dem Beulwert  $k_\tau$  für die allseitig eingespannte Platte ermittelt ( $k_\tau = 8,98 + \frac{5,6}{\alpha^2}$ ).

Für die Träger T1, T2, T11 und T22 ist das rechnerische Grenzbiegemoment für die Traglast maßgebend. Diese Werte weichen jedoch deutlich von den Versuchsergebnissen ab.

Für alle anderen Träger liegt das Verhältnis  $V_Q / V_{exp}$  nach Spalte 6 zwischen 0,68 und 0,92.

Für  $k_\tau = 8,98 + \frac{5,6}{\alpha^2}$  stimmen Versuchs- und Rechenergebnisse deutlich besser überein (Spalte 7).

Aus dem Vergleich der Spalten 8 und 9 ist es zu erkennen, daß auch die gemessenen Werte der Fließgelenkabstände beträchtlich größer sind als die theoretischen Ergebnisse für die Träger der Serie 1.

Die Spalte 10 stellt die theoretischen Werte des Neigungswinkels der Zugfelddiagonalen dar. Der Winkel  $\Phi$  wurde iterativ berechnet. Seine Beträge unterschieden sich vom gemessenen Winkel  $\Phi$ , der für alle Träger mit dicken Gurten dem Neigungswinkel der Stegfelddiagonalen ( $\Phi_{exp} = \arctan \frac{350}{875}$ ) entsprach, um ca. 30%.

Tab. 7 Vergleich der Versuchsergebnisse mit den berechneten Werten nach DAST-Ri 015 und Balkentheorie

	$V_{exp} = 0,688 \cdot F$ [kN]	$V_M$ [kN]	$V_Q$ [kN]	$V_{Q,g}$ [kN]	$V_Q / V_{exp}$ [-]	$V_{Q,g} / V_{exp}$ [-]	$c_{exp}$ [mm]	$c_1$ [mm]	$\Phi$ [°]
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
T1	38,9	9,2	34,6	45,7	$V_M/V_{exp}=0,24$	$V_M/V_{exp}=0,24$	-	-	-
T2	48,8	36,7	36,8	47,7	0,75	0,98	-	-	-
T3	63,6	151,4	47,5	58,2	0,75	0,92	437	291	14,5
T4	57,9	151,4	40,8	47,0	0,70	0,81	420	279	14,5
T5	27,7	151,4	24,2	26,0	0,87	0,94	450	333	16,0
T11	29,1	5,4	41,0	54,6	$V_M/V_{exp}=0,19$	$V_M/V_{exp}=0,19$	-	-	-
T22	39,5	14,8	41,0	54,6	$V_M/V_{exp}=0,37$	$V_M/V_{exp}=0,37$	-	-	-
T33	79,3	74,4	54,2	66,2	0,68	0,83	240	246	13,8
T44	39,2	74,4	28,9	34,6	0,74	0,88	305	354	16,0
T55	24,8	74,4	22,8	24,6	0,92	0,99	345	337	16,0

$V_{exp}$  -experimentelle Querkraft, F-Einzellast,  $V_M$ -Querkraft, die dem Grenzbiegemoment entspricht,  $V_Q$ -nach DAST-Ri 015 berechnete Grenzquerkraft,  $V_{Q,g}$ -nach DAST-Ri 015 berechnete Grenzquerkraft mit  $k_\tau=8,98+5,6/\alpha^2$ ,  $c_{exp}$ ,  $c_1$ -gemessener und nach DAST-Ri 015 berechneter Fließgelenkabstand im Obergurt,  $\Phi$ -Neigungswinkel der Zugfelddiagonale.

Die große Abweichung zwischen theoretischer und experimenteller Traglast für den Träger T1 kann damit erklärt werden, daß die DASt-Ri nur die Gurte an der Biegemomentenbeanspruchbarkeit beteiligt, obwohl der Steg infolge geringer Querkraftbeanspruchung noch Traglastreserven besitzt. Hier würde eine Berücksichtigung effektiver Querschnittswerte mit Annahme einer elastischen Spannungsverteilung für den Steg bessere Ergebnisse bringen. Der effektive Querschnitt wurde nach [3] bestimmt. Die auf diese Weise aus dem Grenzbiegemomenten  $M_{R,d}$  berechneten "Grenz"-Querkkräfte für die Träger mit Gurtquerschnittsklasse 4 (nach [3] ( $0,5 \cdot b_f/t_f > 14\varepsilon$ , mit  $\varepsilon = [235/R_{p0,2}]^{0,5}$ ) gehen aus der Tab. 8 hervor.

$$M_{R,d} = W_{pl,f} \cdot f_{y,f} + W_{el,w} \cdot f_{y,w}$$

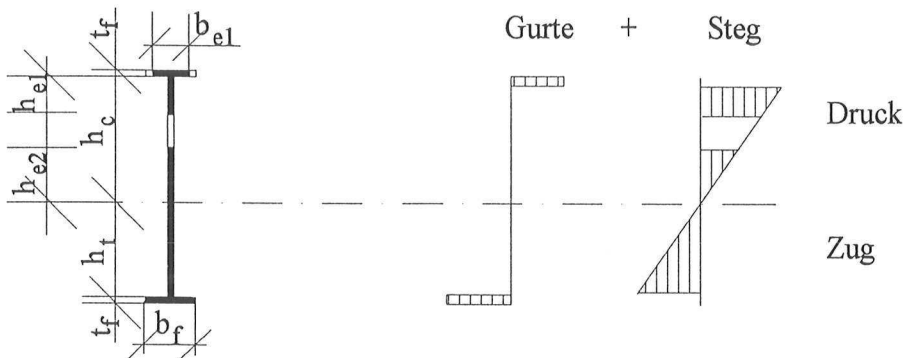


Bild 16 Effektiver Querschnitt und Spannungsverteilung

Tab. 8 Experimentelle und berechnete Querkraftwerte  $V_{M,G}$  mit Berücksichtigung des Steges

	T1	T2	T11	T22
1	2	3	4	5
$V_{M,G}$ [kN]	34,1	48,9	21,1	21,8
$V_{exp} = F \cdot 0,688$ [kN]	38,9	48,8	29,1	39,5
$V_{M,G} / V_{exp}$ [-]	0,88	1,00	0,73	0,55

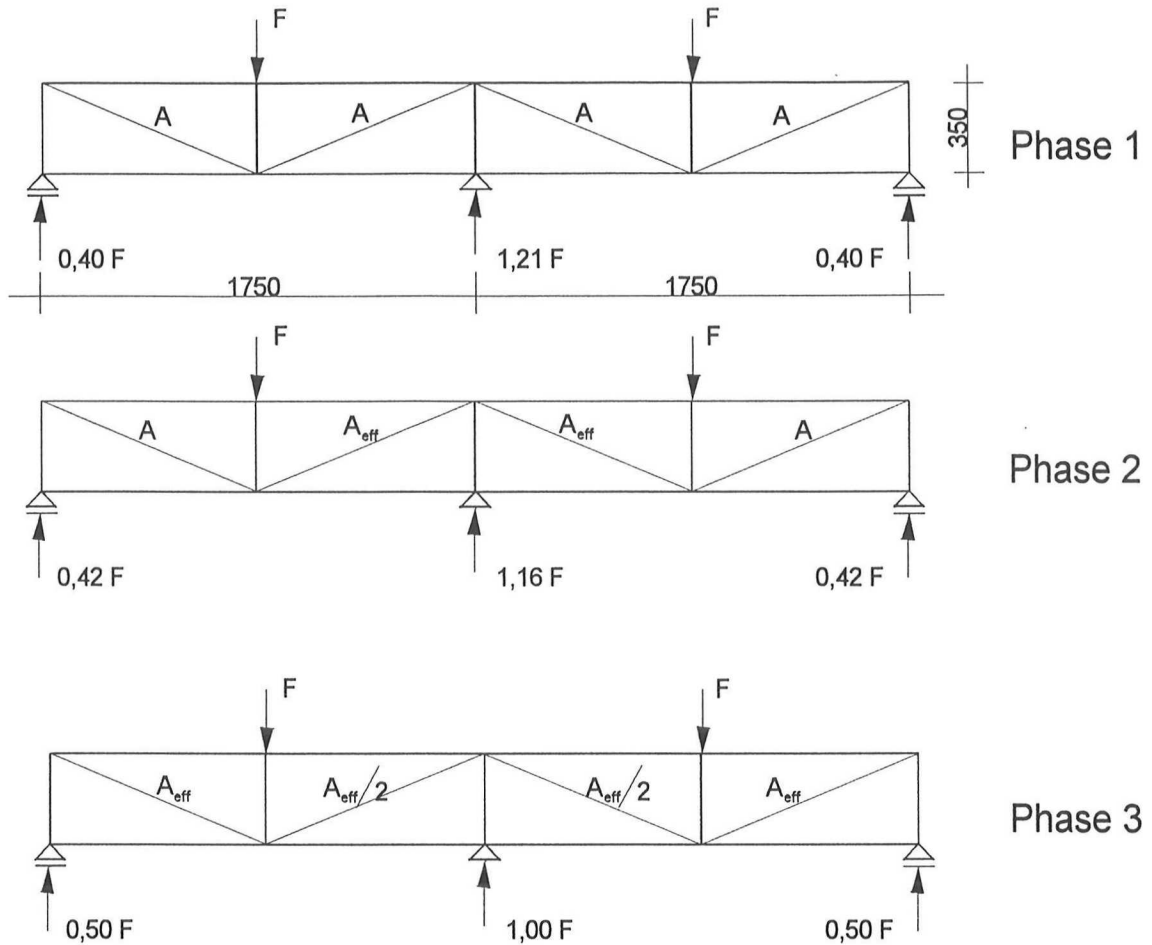
### 5 Fachwerkmodell

Aus der Tab. 4 und dem Bild 10 ist zu sehen, daß das Verhältnis der mittleren zur äußeren Auflagerkraft  $\alpha = R_m / R_o$  für die Träger T3, T4 und T5 bei der Traglast kleiner als 2,0 ist. Nach der Balkentheorie ist dies unmöglich. Auch die Anfangswerte von  $\alpha$ , im unterkritischen Zustand der Träger, deuten an, daß die Balkentheorie nicht mehr zutreffend.

Als einfachstes und relativ leicht nachvollziehbares Modell soll hier das nachfolgend gezeigte Strebenfachwerk zur Verifizierung der Versuchsergebnisse dienen. Die Umlenkung der inneren Kräfte ist von der Steifigkeit des Steges (Fachwerkdiagonale) abhängig. Mit zunehmender Belastung bilden sich die Zugfelder (bedeutet Reduzierung der Schubsteifigkeit) - zuerst in der Trägermitte und dann auch in äußeren Stegfeldern. Das entspricht der Reihenfolge der Querschnittsreduzierung der Diagonalen. Die Querschnitte der Fachwerkstäbe entsprechen den Blechquerschnitten des Versuchsträgers. Die auf diese Weise erhaltenen Ergebnisse gehen aus der Tabelle 9 und Bild 17 hervor.

Tab. 9 Auflagerkräfte im Fachwerkmodell

		Phase 1	Phase 2	Phase 3
<b>T1</b>	$R_M$ [kN]	1,30·F	1,29·F	1,23·F
	$R_E$ [kN]	0,35·F	0,36·F	0,39·F
	$R_M / R_E$	3,71	3,58	3,15
<b>T2</b>	$R_M$ [kN]	1,28·F	1,26·F	1,18·F
	$R_E$ [kN]	0,36·F	0,37·F	0,41·F
	$R_M / R_E$	3,56	3,41	2,88
<b>T3</b>	$R_M$ [kN]	1,20·F	1,16·F	1,00·F
	$R_E$ [kN]	0,40·F	0,42·F	0,50·F
	$R_M / R_E$	3,00	2,76	2,00
<b>T4</b>	$R_M$ [kN]	1,19·F	1,12·F	0,96·F
	$R_E$ [kN]	0,41·F	0,44·F	0,52·F
	$R_M / R_E$	2,90	2,55	1,85
<b>T5</b>	$R_M$ [kN]	1,16·F	1,04·F	0,88·F
	$R_E$ [kN]	0,42·F	0,48·F	0,56·F
	$R_M / R_E$	2,77	2,17	1,57



A - Fläche des Steges  
 $A_{\text{eff}}$  - wirksame Fläche des Steges

Bild 17 Fachwerkmodell für den Träger T3

## 6 Vorschlag des Berechnungsverfahrens

### 6.1 Träger der Serie 1 (mit dem Verhältnis $L/h < 5$ ( $L$ - Stützweite, $h$ - Trägerhöhe))

Aus den durchgeführten Versuchen ist zu schlußfolgern, daß die Verteilung der inneren Kräfte in zwei Schritten erfolgt. Mit zunehmender Belastung bleibt das Verhältnis  $\alpha = R_M / R_E$  bis zum Wert  $F_1$  konstant. Der Endwert  $\alpha$  wird als 2,0 angenommen.

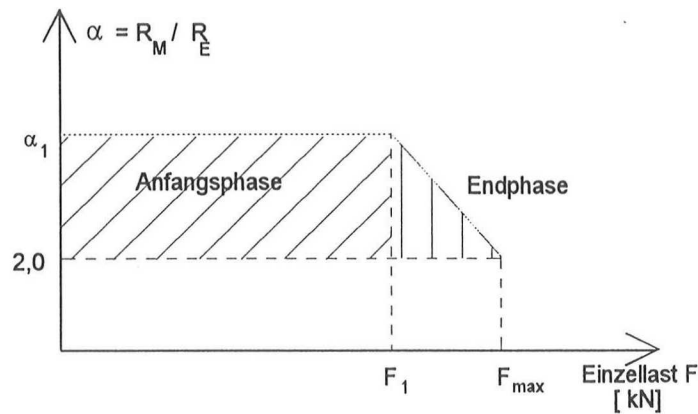


Bild 18 Berechnungsmodell der Träger der Serie 1

- A) Ermittlung der Schnittkräfte nach dem Fachwerkmodell in der Anfangsphase
- B) Ermittlung der Schnittkräfte wie für zwei nebenstehende Einfeldträger (Endphase)
- C) Nachweis der Biegemomenten- und Querkrafttragfähigkeit

$$\frac{M_{\max}}{M_{R,d}} \leq 1$$

$$\frac{V_{\max}}{V_{R,d}} \leq 1$$

$V_{R,d}$  - nach DAST-Ri 015

$M_{R,d}$  - wie im Punkt 4

Diese zwei Bedingungen sind in beiden Phasen nachzuweisen. Wenn in der Anfangsphase das Biegemoment maßgebend für die Tragfähigkeit ist, wird die Endphase nicht berücksichtigt.

## 6.2 Träger der Serie 2 (mit dem Verhältnis $L/h > 5$ ( $L$ - Stützweite, $h$ - Trägerhöhe))

Die Berechnung könnte analog zum Verfahren aus dem Punkt 6.1 erfolgen. Die Werte  $\alpha_1$  in der Anfangsphase sind nach der Balkentheorie mit Berücksichtigung der Querkraftverformungen zu berechnen. Die Endwerte des Verhältnisses der Reaktionskräfte sind von der Schlankheit des Steges abhängig und können auch bis zum Wert 2,0 abnehmen. Für große  $b/t$ -Verhältnisse der Stege entsprechen die  $\alpha$ -Werte denen aus dem Fachwerkmodell. Die exakte Bestimmung, bei welchen  $b/t$ -Verhältnissen die vollständige Durchlaufwirkung verlorenght, erfordert eine FEM-Analyse.

## 7 *Schlußfolgerungen*

Die Träger mit schlanken Stegen können ihre Durchlaufwirkung verlieren. Dies ist jedoch vom  $b/t$  -Verhältnis des Steges, sowie der Stützweite des Trägers und der Steghöhe abhängig. Die Durchlaufwirkung längerer Träger geht nur geringfügig verloren. Wie die Versuche zeigen, ist die Verteilung der Reaktionskräfte nach der Balkentheorie für die Träger mit entsprechend großem  $b/t$  -Verhältnis und/oder ausreichend kleinem  $L/h$  -Verhältnis auch im unterkritischen Zustand nicht zutreffend. Bessere Ergebnisse ergeben sich aus dem Fachwerkmodell.

Die Abweichung zwischen experimentellen und nach DAST-Ri 015 (bei nach der Balkentheorie ermittelten Schnittkräften) bestimmten Werten der Grenzquerkraft beträgt bis zu 30% bei voller Zugfeldwirkung ( $\eta = 1,0$ ). Beim Biegemomententragfähigkeitsnachweis sollte der effektive Querschnitt des Steges berücksichtigt werden.

## 8 *Literatur*

1. **Scheer, J.; Pasternak, H.:** Behaviour of continuous plate girders with slender, transversely stiffened webs. Proceedings of The Third Pacific Structural Steel Conference, Tokyo, 1992, Oct., 361-372.
2. DAST-Ri 015: Träger mit schlanken Stegen, 1990
3. ENV 1993-1-1, Eurocode 3: Design of Steel Structures, Part 1.1, 1992



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



Dipl.-Ing. P. Branka  
Sachbearbeiter